

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Sc. A.

PAR
Éric LACHANCE TREMBLAY

INCORPORATION DE PARTICULES DE VERRE POST-CONSOMMATION DANS UN
ENROBÉ BITUMINEUX DE TYPE ESG14

MONTREAL, LE 16 OCTOBRE 2014

©Tous droits réservés, Éric Lachance Tremblay, 2014

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre média une partie importante de ce document doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Michel Vaillancourt, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Perraton, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathieu Meunier, codirecteur de mémoire
Solmatech

M. Alan Carter, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Kevin Bilodeau, membre du jury
Directeur technique – Matériaux, Groupe Bauval

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17 SEPTEMBRE 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Dans un premier temps, je tiens à remercier mes parents, Rémi et Élane qui m'ont toujours encouragé dans mes études. C'est grâce à leurs encouragements que j'ai pu poursuivre mes études à l'université et je leur en serais reconnaissant à tous jamais. Je tiens aussi à remercier ma sœur, Anne, pour ces encouragements durant mes études et ma copine, Geneviève Paré, pour son soutien et surtout, sa patience sans limites. Cette maîtrise a demandé beaucoup de sacrifice, mais j'y suis finalement parvenu.

De nombreuses personnes m'ont apporté du soutien et ont contribué à faire de ce travail un succès. Tout d'abord, je remercie mon directeur de recherche, M. Michel Vaillancourt, d'avoir accepté de diriger mes travaux et de m'avoir fait confiance. Je remercie aussi mes codirecteurs, M. Daniel Perraton, qui m'a toujours fait confiance et qui m'a transmis la passion de la recherche et M. Mathieu Meunier, d'avoir amorcé ce projet. Je remercie aussi M. Alan Carter de m'avoir transmis la passion pour les enrobés bitumineux ainsi que M. Kevin Bilodeau d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens aussi à remercier mes collègues du LCMB qui m'ont apporté de l'aide et du support moral lors de la réalisation de ce projet. Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à M. Francis Bilodeau qui m'a grandement aidé dans la réalisation des essais. Francis m'a été d'une grande aide, et surtout, un très bon ami. Je veux aussi remercier M. Sébastien Lamothe, un collègue et ami que j'admire pour ces connaissances et sa rigueur au travail. Un merci spécial à mon ami Olivier Lalonde Renaud, pour sa présence tout au long de la réalisation de ce projet. Sa présence et son support moral m'ont beaucoup aidé à garder la motivation nécessaire à la réussite de ce projet. Enfin, je tiens à remercier l'ensemble de mes collègues de l'ÉTS qui ont contribué de près ou de loin à ce projet. De plus, je remercie les entreprises *Construction DJL*, *McAsphalt* et *Tricentris* pour la fourniture des matériaux.

INCORPORATION DE PARTICULES DE VERRE POST-CONSOMMATION DANS UN ENROBÉ BITUMINEUX DE TYPE ESG14

Éric LACHANCE-TREMBLAY

RÉSUMÉ

En 2008, environ 244,000 tonnes de verre ont été générées par la société québécoise dont plus de 128,000 tonnes ont été récupérées par divers moyens de collecte. Le recyclage de verre représente une problématique puisque le verre qui se brise durant le processus de collecte et de transport ne peut être réutilisé dans la fabrication de nouveaux produits de verre. Il convient donc de trouver de nouvelles sources d'utilisations pour ce matériau. Puisque la réutilisation de matériaux recyclés dans les matériaux de chaussées est bénéfique d'un point de vue environnemental et souvent comportemental, l'idée d'incorporer des particules de verre post-consommation dans les enrobés bitumineux a refait surface dernièrement au LCMB. Actuellement, l'incorporation des particules de verre post-consommation dans les enrobés bitumineux n'est pas régie par le MTQ.

Le projet réalisé au LCMB visait à vérifier la possibilité d'utiliser des particules de verre post-consommation dans un enrobé de type ESG14 tout en conservant des propriétés et performances équivalentes à celles d'un enrobé conventionnel. Des enrobés contenant différents dosages en particules de verre ont été confectionnés pour étudier l'effet du verre sur les caractéristiques volumétriques, l'aptitude au compactage et sur la résistance à l'orniérage. Ces enrobés ont été formulés selon la méthode de formulation LC du MTQ. Cette étude a permis de cibler un dosage optimal en particules de verre. Par la suite, les performances thermomécaniques (résistance aux basses températures (TSRST), module complexe (E^*) et résistance à la fissuration par fatigue), les caractéristiques physiques (macrotexture et adhérence) ainsi que la durabilité (tenue à l'eau) de cet enrobé avec verre ont été comparées avec un enrobé de référence. Les résultats montrent que les enrobés de type ESG14 avec des particules de verre formulés selon la méthode LC sont plus sensibles à l'orniérage. Par contre, une réduction de la quantité de bitume permet de répondre à ce problème et d'obtenir un enrobé avec verre avec des performances équivalentes à celles d'un enrobé conventionnel au niveau de la résistance à la propagation de fissures à basse température, de la rigidité, de la résistance à la fatigue de même qu'au niveau des caractéristiques physiques. Par contre, l'ajout de particules de verre semble modifier la rhéologie de l'enrobé et a pour effet négatif de diminuer la tenue à l'eau de l'enrobé.

Mots-clés : enrobés bitumineux, verre, recyclé, matériaux de chaussées

INCORPORATION OF RECYCLED CRUSHED GLASS IN AN ESG14 ASPHALT MIXTURE

Éric LACHANCE TREMBLAY

ABSTRACT

In 2008, around 244,000 tons of glass was produced by the Quebec population. From this number, 128,000 tons were collected by various means of collection. Glass recycling is problematic because all the glass that cannot be classified according to the type can't be used to manufacture new products. It is therefore necessary to find new sources of uses for this material. Because the use of recycled materials in road structure material is beneficial from an environmental and sometimes structural point of view, the idea of using recycled glass into asphalt mixture was recently studied at the LCMB. Nowadays, the use of recycled glass in asphalt mixture is not regulated by the MTQ.

This research goal was to verify the possibility of using recycled glass particles in a ESG14 asphalt mixture while maintaining equivalent properties and performance compared to a conventional mix. Different dosages of recycled glass particles have been studied to evaluate the effect of glass on the asphalt mixture volumetric characteristics, the ability of compaction and the rutting resistance. These mixes were formulated according to the LC formulation of the MTQ. The first part allowed selecting an optimal dosage of recycled glass particles. Thereafter, the thermo mechanical performance (resistance to low temperatures (TSRST), complex modulus (E^*) and resistance to fatigue cracking), physical characteristics (macro texture and surface grip) and durability (resistance to water damage) of the asphalt mixture with the optimal dosage were evaluated and compared with a reference mixture. The results show that the ESG14 mixture with recycled glass formulated with the LC method is more susceptible to rutting than the reference mixture. Therefore, a reduction of the bitumen content can increase the rutting resistance while conserving equivalent properties to a conventional mix regarding resistance to low temperatures, complex modulus, resistance to fatigue cracking as well as the physical characteristics. Therefore, the use of recycled in glass seems to modify the asphalt behavior and increase the moisture susceptibility.

Keywords : asphalt mixture, glass, recycling, pavement materials

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Le recyclage du verre	3
1.1.1 Disponibilité du verre de post-consommation à l'échelle du Québec	6
1.1.2 Efficacité du processus de recyclage du verre de post-consommation pour la fabrication de nouveaux produits.....	7
1.1.3 Problématique environnementale liée au recyclage du verre de post-consommation	8
1.2 La structure d'une chaussée bitumineuse	9
1.2.1 Type de sollicitations d'une chaussée bitumineuse	10
1.2.1.1 Effet du trafic	10
1.2.1.2 Effet de la température	11
1.3 Principaux constituants des enrobés bitumineux	12
1.3.1 Granulats	12
1.3.1.1 Porosité d'un granulat	13
1.3.1.2 Nature pétrographique des particules de granulats	13
1.3.1.3 Caractéristiques géométriques des granulats	14
1.3.1.4 Vérifications des performances des granulats.....	14
1.3.2 Liant bitumineux	15
1.3.2.1 Composition chimique du bitume	15
1.3.2.2 Structuration du bitume.....	17
1.3.2.3 Classification des bitumes.....	18
1.3.2.4 Rhéologie du bitume	19
1.3.3 Utilisation de matériaux post-consommation comme constituant dans les enrobés.....	19
1.4 Description des enrobés bitumineux (EB)	20
1.4.1 Différents types d'enrobés bitumineux	21
1.4.2 Principe de la formulation des enrobés bitumineux.....	21
1.4.3 Méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées (LC)	22
1.4.3.1 Les vides interstitiels (V_i).....	24
1.4.3.2 Le volume de granulat brut (V_{gb}) vs volume de granulat effectif (V_{ge}).....	25
1.4.3.3 Les vides intergranulaires (VAM) et les vides comblés par le bitume (VCB).....	25
1.4.3.4 Le volume de bitume effectif (V_{be}).....	26
1.4.3.5 Le volume de bitume absorbé (V_{ba}).....	26
1.5 Comportement des enrobés bitumineux dans les structures routières	27
1.5.1 Viscoélasticité linéaire	28
1.5.1.1 Méthodes d'essai pour la mesure du module complexe	30
1.5.1.2 Représentation graphique des résultats de module complexe....	31
1.5.1.3 Modélisation du module complexe.....	33

1.5.1.4	Principe d'équivalence temps-température (PETT).....	34
1.5.1.5	Paramètres influençant le module complexe	36
1.5.2	Déformation permanente dans les chaussées bitumineuses.....	38
1.5.3	Fissuration à basse température	39
1.5.4	Phénomène de fatigue	40
1.5.4.1	Type d'essai	41
1.5.4.2	Méthodes d'analyse d'un essai de fatigue	42
1.5.4.3	Représentation graphique.....	43
1.5.4.4	Paramètres influençant la résistance à la fatigue	44
1.6	Utilisation du verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux.....	46
1.6.1	Historique de l'utilisation du verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux	46
1.6.2	Formulation des enrobés bitumineux avec verre post-consommation.....	47
1.6.3	Dosage et caractéristiques physiques des particules de verre post-consommation utilisés dans les enrobés bitumineux	47
1.6.4	Impact du verre sur les performances et caractéristiques des enrobés bitumineux	49
1.6.4.1	Caractéristiques thermiques	49
1.6.4.2	Stabilité Marshall	50
1.6.4.3	Résistance aux déformations permanentes	50
1.6.4.4	Rigidité.....	51
1.6.4.5	Teneur en vides	52
1.6.4.6	Sensibilité au dommage dû à l'eau	52
1.6.4.7	Résistance à la fatigue.....	53
CHAPITRE 2	PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	55
2.1	Programme de recherche.....	56
2.1.1	Phase I : Étude de l'effet du dosage en verre.....	57
2.1.2	Phase II : Sélection du dosage optimal en particules de verre post-consommation	57
2.1.3	Phase III : Évaluation et comparaison des performances, des caractéristiques physiques et de la durabilité.....	58
CHAPITRE 3	MATÉRIAUX UTILISÉS, FORMULATION DES ENROBÉS, PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ET MÉTHODES D'ESSAIS ..	59
3.1	Description des matériaux utilisés	59
3.1.1	Caractéristiques des granulats utilisés	59
3.1.1	Caractéristiques des particules de verre utilisées.....	61
3.1.2	Description du bitume utilisé	61
3.2	Description des enrobés confectionnés.....	62
3.2.1	Exigences granulométriques de l'enrobé ESG-14	62
3.2.2	Dosage des enrobés bitumineux avec particules de verre de post-consommation	63
3.3	Confection des enrobés en laboratoire.....	66
3.3.1	Malaxage des enrobés	66

3.3.2	Fabrication des éprouvettes.....	68
3.3.2.1	Éprouvettes pour l'essai de résistance à l'orniérage.....	68
3.3.2.2	Éprouvettes pour les essais thermomécaniques (TM)	69
3.3.2.3	Éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau.....	73
3.4	Description et procédure des différents essais réalisés	74
3.4.1	Formulation.....	74
3.4.1.1	Essai de détermination de la densité maximale	74
3.4.1.2	Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire	75
3.4.2	Essais thermomécaniques (TM).....	75
3.4.2.1	Résistance à l'orniérage	76
3.4.2.2	Résistance à la fissuration thermique : retrait thermique empêché	77
3.4.2.3	Détermination du module complexe.....	79
3.4.2.4	Résistance à la fatigue.....	80
3.4.3	Essai de mesure des caractéristiques physiques.....	81
3.4.3.1	Évaluation de la macro texture par hauteur de sable	81
3.4.3.2	Mesure de l'adhérence au pendule SRT	82
3.4.4	Essai de durabilité.....	83
3.4.4.1	Tenue à l'eau.....	83
CHAPITRE 4	PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS	85
4.1	Sommaire des essais réalisés	85
4.2	Phase I - étude du dosage en verre.....	86
4.2.1	Caractéristiques volumétriques.....	86
4.2.2	Évaluation de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire	93
4.2.3	Résistance à l'orniérage	99
4.3	Phase II - sélection du dosage optimal en particules de verre post-consommation...	104
4.4	Phase III - évaluation des performances	108
4.4.1	Essai de résistance au retrait thermique empêché.....	108
4.4.2	Essai de détermination du module complexe.....	111
4.4.2.1	Courbes isothermes de l'éprouvette ESG-14R-P2B3X	112
4.4.2.2	Évolution du module complexe de l'éprouvette ESG-14R- P2B3X dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black.....	113
4.4.2.3	Courbe maîtresse à 10°C et variation des facteurs de translation de l'éprouvette ESG-14R-P2B3X.....	115
4.4.2.4	Paramètres 2S2P1D	117
4.4.3	Essai de résistance à la fissuration par fatigue.....	118
4.4.3.1	Évolution de la température	119
4.4.3.2	Évolution de la norme du module complexe	120
4.4.3.3	Évolution de l'angle de phase.....	121
4.4.3.4	Indice de qualité des signaux	121
4.4.3.5	Évolution de la déformation.....	122
4.4.3.6	Évolution de l'amplitude de contrainte.....	125
4.4.3.7	Évolution du centre de contrainte	126

	4.4.3.8	Évolution du centre de déformation.....	126
	4.4.3.9	Évolution de l'énergie dissipée.....	128
	4.4.4	Évaluation des caractéristiques physiques.....	128
	4.4.4.1	Évaluation de la macro texture par hauteur de sable	129
	4.4.4.2	Mesure de l'adhérence au pendule SRT	130
	4.4.5	Évaluation de la durabilité	130
4.5		Sommaire des résultats des essais réalisés.....	132
CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS.....			135
5.1		Essai de retrait thermique empêché (TSRST).....	135
5.2		Essai de détermination du module complexe.....	137
	5.2.1	Écart des essais de module complexe dans un domaine fréquentiel équivalent.....	139
	5.2.2	Analyse des courbes dans le plan Cole-Cole	141
	5.2.3	Analyse des courbes maîtresses	142
5.3		Essai de résistance à la fatigue.....	143
	5.3.1	Analyse des résultats des essais de fatigue	144
	5.3.2	Endommagement lors des essais de résistance à la fatigue	148
	5.3.3	Critères de rupture de fatigue.....	150
	5.3.3.1	Critère de rupture classique ($Nf_{50\%}$)	150
	5.3.3.2	Critère de transition entre les phases II et III ($Nf_{II/III}$)	151
	5.3.4	Relation entre les durées de vie et les amplitudes de déformation : droites de fatigue selon la loi de Wöhler	153
CONCLUSION.....			157
ANNEXE I		FORMULE DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE ESG14.....	159
ANNEXE II		FORMULE DE L'ENROBÉ ESG-14V-10-B	163
ANNEXE III		ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME.....	167
ANNEXE IV		COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS	171
ANNEXE V		RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE	177
ANNEXE VI		RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE.....	185
BIBLIOGRAPHIE.....			211

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Utilisations des différents types de verre4
Tableau 1.2	Utilisations possible pour le verre mixte de post-consommation6
Tableau 1.3	Composition chimique des bitumes16
Tableau 1.4	Domaine d'application et dosage des matériaux de post-consommation ..20
Tableau 1.5	Exigences relatives à l'essai à la presse à cisaillement giratoire24
Tableau 1.6	Résultats des essais de résistance à l'orniérage51
Tableau 3.1	Caractéristiques des granulats utilisés.....60
Tableau 3.2	Caractéristiques des particules de verres utilisés61
Tableau 3.3	Caractéristiques du bitume utilisé (selon le fournisseur)62
Tableau 3.4	Caractéristiques des enrobés bitumineux65
Tableau 3.5	Températures cibles pour la fabrication des enrobés en laboratoire67
Tableau 3.6	Temps de cure à l'étuve des enrobés pour les différents essais réalisés68
Tableau 3.7	Caractéristiques physiques des éprouvettes testées.....72
Tableau 3.8	Caractéristiques des éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau73
Tableau 3.9	Exigences relatives à l'essai d'aptitude au compactage à la PCG pour un enrobé ESG-1475
Tableau 3.10	Exigences relatives à la résistance à l'orniérage.....76
Tableau 3.11	Paramètres de l'essai de résistance à l'orniérage77
Tableau 3.12	Paramètres de l'essai de retrait thermique empêché78
Tableau 3.13	Paramètre d'essai pour la détermination du module complexe80
Tableau 4.1	Sommaire des essais effectués85
Tableau 4.2	Résultats des essais de d_{mm}87

Tableau 4.3	Exemple de l'influence de la variation des résultats de d_{mm} sur le calcul du V_{be}	88
Tableau 4.4	Résumé des valeurs de pourcentage de bitume d'ajout et densité maximale des EB étudiés	89
Tableau 4.5	Surface spécifique des différents EB étudiés	92
Tableau 4.6	Résumé des résultats de l'essai de l'aptitude au compactage.....	94
Tableau 4.7	Indices des vides à 0 giration pour tous les EB testés	98
Tableau 4.8	Résultats des essais de résistance à l'orniérage	100
Tableau 4.9	Vide intergranulaire et vide comblé par le bitume des mélanges testés à l'essai de résistance à l'orniérage	101
Tableau 4.10	Résultats d'essais à la PCG des deux EB avec 10 % de verre.....	106
Tableau 4.11	Résultats des essais de résistance à l'orniérage pour les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-10-B.....	107
Tableau 4.12	Résultats des essais de résistance au retrait thermique empêché	109
Tableau 4.13	Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour la mesure du module complexe	112
Tableau 4.14	Paramètres du modèle 2S2P1D tiré des essais de module complexe.....	117
Tableau 4.15	Résultats des essais d'évaluation de la macrotexture	129
Tableau 4.16	Résultats des essais de mesure de l'adhérence	130
Tableau 4.17	Résultats des essais de la tenue à l'eau pour les enrobés ESG-14R et ESG-14V-10-B.....	131
Tableau 4.18	Sommaire des résultats des essais réalisés	132
Tableau 5.1	Validation de la répétabilité de l'essai de module complexe pour chacun des enrobés testés.....	138
Tableau 5.2	Sommaire des résultats des essais de fatigue pour l'EB de référence....	146
Tableau 5.3	Sommaire des résultats des essais de fatigue pour l'EB avec verre.....	147
Tableau 5.4	Sommaire des durées de vie pour l'essai ESG-14R-P2B2	152
Tableau 5.5	Caractéristiques des droites de fatigue ($T_{consigne} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$) ...	153

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Exemple de verre de type mixte concassé.....4
Figure 1.2	Localisation des centres de tri du Québec.....7
Figure 1.3	Coupe type d'une structure de chaussée9
Figure 1.4	Schématisation des sollicitations dans une chaussée11
Figure 1.5	Illustration des dommages dus à la variation de température12
Figure 1.6	Schématisation des vides d'une particule13
Figure 1.7	Comportement du bitume en fonction de la température.....19
Figure 1.8	Diagramme des phases23
Figure 1.9	Catégories de comportement des enrobés bitumineux.....27
Figure 1.10	Courbes isotherme d'un essai de module complexe.....31
Figure 1.11	Plan Cole-Cole d'un essai de module complexe32
Figure 1.12	Courbe dans l'espace de Black d'un essai de module complexe33
Figure 1.13	Modèle rhéologique 2S2P1D34
Figure 1.14	Courbe maîtresse d'un essai de module complexe à 10°C36
Figure 1.15	Illustration du mécanisme d'orniérage dans les enrobés bitumineux39
Figure 1.16	Évolution du module complexe lors d'un essai de fatigue41
Figure 1.17	Courbe de Wöhler43
Figure 2.1	Organigramme du programme expérimental56
Figure 3.1	Points de contrôle, zone de restriction et courbe granulométrique de l'enrobé de référence ESG-14.....64
Figure 3.2	Cure des plaques destinées au carottage des éprouvettes.....70
Figure 3.3	Patron de carottage.....71

Figure 3.4	Nomenclature pour les éprouvettes	71
Figure 3.5	Résultat type d'un essai de retrait thermique empêché	79
Figure 3.6	Pendule SRT	83
Figure 4.1	Évolution du V_{ba} (%) et du b (%) en fonction du dosage en particules de verre dans l'enrobé	89
Figure 4.2	Évolution relative du V_{ba} estimé et du V_{ba} réel, exprimée en référence aux valeurs de l'enrobé de référence, en fonction du dosage en particules de verre dans l'enrobé.....	91
Figure 4.3	Évolution de la surface spécifique du squelette granulaire et du granulat de verre (combiné des particules de verre A et D) en fonction du dosage en particules de verre pour les EB étudiés	92
Figure 4.4	Indice des vides (%) en fonction du nombre de girations à l'essai de PCG	95
Figure 4.5	Indice des vides (%) en fonction des différents dosages en verre à l'essai de PCG.....	95
Figure 4.6	Exemple du calcul du taux de variation de l'indice des vides pour l'EB de référence	96
Figure 4.7	Taux de variation des variations de l'indice des vides pour les EB en fonction du dosage en verre	97
Figure 4.8	Écart relative des indices des vides ainsi que de la teneur en particules passant au tamis 0,080 mm par rapport à l'EB de référence.....	99
Figure 4.9	Résultats des essais de résistance à l'orniérage	101
Figure 4.10	Compacité des EB à 10, 100 et 200 girations ainsi que des plaques testées à l'essai d'orniéreur	103
Figure 4.11	Photos prise au microscope des particules de verre et de la pierre calcaire	104
Figure 4.12	Indice des vides à l'essai PCG pour les deux EB avec 10 % de verre....	106
Figure 4.13	Résultats des essais de résistance à l'orniérage pour les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-10-B.....	107
Figure 4.14	Évolution de la contrainte en fonction de la température pour l'ESG-14R (Taux de refroidissement de 10°C/h).....	110

Figure 4.15	Évolution de la contrainte en fonction de la température pour l'ESG-14V-10-B (Taux de refroidissement de 10°C/h)110
Figure 4.16	Courbes isotherme pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P) ...113
Figure 4.17	Plan Cole-Cole pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P).....114
Figure 4.18	Résultats pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X dans l'espace de Black (PG 64-34P)115
Figure 4.19	Courbe maîtresse (10°C) pour l'essai ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P) ..116
Figure 4.20	Variation des a_t en fonction de la température pour l'essai ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P).....116
Figure 4.21	Évolution de la température en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X119
Figure 4.22	Évolution de la norme du module complexe en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X.....120
Figure 4.23	Variation de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X121
Figure 4.24	Évolution des indices de qualités des signaux en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X.....122
Figure 4.25	Évolution de l'amplitude de déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X123
Figure 4.26	Évolution de l'écart entre les extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X.....124
Figure 4.27	Variation de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X.....125
Figure 4.28	Variation du centre de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X.....126
Figure 4.29	Évolution du centre de déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X.....127
Figure 4.30	Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X128

Figure 5.1	Évolution de la norme du coefficient de rigidité dans le domaine de fréquence équivalente pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X par rapport à l'éprouvette ESG-14V-P2B1X	140
Figure 5.2	Évolution de l'angle de phase du coefficient de rigidité dans le domaine de fréquence équivalente pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X par rapport à l'éprouvette ESG-14V-P2B1X.....	141
Figure 5.3	Résultats des essais de module complexe analysés dans le plan Cole-Cole	142
Figure 5.4	Courbes maîtresse ($T_{ref} = 10^{\circ}C$) des éprouvettes ESG-14R-P2B3X et ESG-14V-P2B1X.....	143
Figure 5.5	Perte de module dans les premiers cycles d'un essai de fatigue et zone d'extrapolation pour la valeur de module initial.....	145
Figure 5.6	Évolution du dommage en fonction du nombre de cycles des essais de fatigue réalisés sur l'enrobé ESG-14R	149
Figure 5.7	Évolution du dommage en fonction du nombre de cycles des essais de fatigue réalisés sur l'enrobé ESG-14V-10-B.....	149
Figure 5.8	Exemple de détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture classique de l'éprouvette ESG-14R-P2B2	150
Figure 5.9	Exemple de détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture associé à l'écart moyen des extensomètres de l'éprouvette ESG-14R-P2B2	151
Figure 5.10	Exemple de détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture associé à la valeur maximale de l'angle de phase ESG-14R-P2B2	152
Figure 5.11	Droite de fatigue pour l'ESG-14R et l'ESG-14V-10-B selon le critère $N_{f_{II/III}}$ à $10^{\circ}C$ et 10 Hz (PG 64-34P)	154
Figure 5.12	Droite de fatigue pour l'ESG-14R et l'ESG-14V-10-B selon le critère $N_{f_{50\%}}$ à $10^{\circ}C$ et 10 Hz (PG 64-34P).....	154

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

3RV	Réduction à la source, Réemploi, Recyclage et Valorisation
2S2P1D	Combinaison de deux ressorts, deux patins et un amortisseur
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ASTM	American Society for Testing and Materials
Abs	Absorption
BPF	Bardeau post-fabrication
DJMA	Débit journalier moyen annuel
EB	Enrobé bitumineux
Éch.	Échantillon
ESG	Enrobé semi-grenu
ÉTS	École de technologie supérieure
FAT	Essai de résistance à la fatigue
GBR	Granulat bitumineux recyclé
GNM	Grosseur nominale maximale
IFFT	<i>Indirect tensile fatigue test</i>
LA	Los Angeles
LC	Laboratoire des chaussées
LCMB	Laboratoire sur les Chaussées et Matériaux Bitumineux
MD	Micro-Deval
MLPC	Matériel du Laboratoire des Ponts et Chaussées
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PETT	Principe d'Équivalence Temps Température

PCG	Presse à cisaillement giratoire
PG	Grade de performance d'un bitume (<i>Performance Grade</i>)
R.P.M.	Rotation par minute
SHRP	<i>Strategic Highway Research Program</i>
SRT	<i>Skid Resistance Tester</i>
TM	Thermomécanique
TSRST	Essai de résistance au retrait thermique empêché (<i>Thermal Stress Restrained Specimen Test</i>)
WLF	Loi de William-Landel-Ferry

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

%	Pourcentage
\$	Dollar
°	Degré
°C	Degré Celsius
ω	Pulsation
α	Surface spécifique
φ	Angle de phase
φ_E	Angle de phase d'un enrobé
φ_{C^*}	Angle de phase du coefficient de rigidité
β	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
δ	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
a_T	Facteur de translation
AT	Stabilité après trempage
b (%)	Bitume d'ajout
σ	Contrainte
σ_0	Contrainte initiale
σ_A	Amplitude du signal de contrainte
C_1	Constante qui dépend du matériau testé pour la loi de WLF
C_2	Constante qui dépend du matériau testé pour la loi de WLF
c_1	Coefficient correspondant à la durée de vie de l'EB pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m à une température donnée et une fréquence donnée
c_2	Coefficient lié à la pente de la droite de fatigue de l'EB

C^*	Coefficient de rigidité
$ C^* $	Norme du coefficient de rigidité
d_{gb}	Densité du granulat brut
d_{mb}	Densité du mélange brut
d_{mm}	Densité maximale
ε	Déformation
ε_0	Déformation initiale
ε_A	Amplitude du signal de déformation
ε_6	Déformation associée à un million de cycles
Δ_{ext}	Delta (variation) d'un extensomètre
E^*	Module complexe
$ E^* $	Norme du module complexe
E_0	Module vitreux
E_{00}	Module statique
E_1	Composante élastique
E_2	Composante visqueuse
F	Fréquence
g	Gramme
G	Grandeur du signal
h	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
h	Heure
Hz	Hertz
IQ	Indice de qualité (%)

k	Constante sans dimension pour le modèle 2S2P1D
kg	Kilogramme
kPa	Kilopascal
kN	Kilo Newton
N	Nombre de cycles
n	Nombre de cycles
N	Newton
N_f	Nombre de cycle à la rupture pour un essai de fatigue
$N_{f50\%}$	Nombre de cycle à la rupture associé à une perte de 50 % de la valeur du module initial
$N_{fII/III}$	Nombre de cycle à la rupture associé à la transition entre les phases II et III
$N_{f\Delta ext}$	Nombre de cycle à la rupture associé à un écart d'un extensomètre
$N_{f\phi max}$	Nombre de cycle à la rupture associé à la valeur maximale de l'angle de phase
S.O.	Non applicable
m	Mètre
mm	Millimètre
μm	Micromètre (10^{-6} m)
μdef	Microdéformation ($\mu m/m$)
MPa	Méga pascal
P_{ba}	Pourcentage de bitume absorbé
PMM	Profondeur moyenne de macro texture
Rad	Radians
R^2	Coefficient de qualité d'une régression linéaire

ST	Stabilité sans trempage
t	Temps
t_{lag}	Temps de déphasage entre deux signaux
θ	Température
T°	Température
T°_{ref}	Température de référence
T_e	Température élevée de caractérisation du bitume
T_b	Température basse de caractérisation du bitume
τ_0	Temps de relaxation
V	Volume
V_{be}	Volume de bitume effectif
V_{ba}	Volume de bitume absorbé
V_i	Vides interstitiels
V_{mb}	Volume du mélange brut
V_{mm}	Volume maximal du mélange
V_{gb}	Volume du granulat brut
V_{ge}	Volume du granulat effectif
VAM	Volume des vides intergranulaires
VCB	Vides comblés par le bitume
W_{dis}	Énergie dissipée

INTRODUCTION

L'incorporation de matériaux de post-consommation dans la fabrication de matériaux neufs est de plus en plus favorisée. Selon la politique du développement durable du gouvernement du Québec (Québec, 2011), l'objectif pour 2015 est de recycler 70 % des matières comme le papier, le carton, le plastique, le métal ainsi que le verre. Il convient donc de trouver de nouvelles manières afin de pouvoir réutiliser ces matériaux post-consommation. Un domaine où la réutilisation de matériaux de post-consommation est très présente est le secteur des matériaux de chaussées.

Selon le Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction (Québec, 2002), le choix de la méthode de gestion des matières résiduelles doit être fait selon l'ordre suivant : la réduction à la source, le réemploi, le recyclage, la valorisation et en dernier lieu, l'élimination. Bien entendu, cela est fait dans la mesure où les matériaux ne représentent aucun risque pour l'environnement. À ce jour, le ministère des Transports (MTQ) permet d'incorporer dans les enrobés bitumineux des granulats bitumineux recyclés (GBR) provenant du planage de chaussée existante. La quantité maximale permise est fixée à 20 % de la masse totale des granulats. Par contre, pour les enrobés utilisés pour couche de surface d'autoroute ainsi que les bretelles et les collecteurs, le dosage maximal est fixé à 10 % (Québec, 2013). De plus, le MTQ permet aussi l'utilisation de bardeau d'asphalte post-fabrication dans les enrobés jusqu'à un dosage de 5 % en couche de base et 3 % en couche de surface (Québec, 2013). En ce qui concerne l'utilisation de bardeau post-consommation, plusieurs projets pilotes sont en cours afin d'étudier les impacts sur le comportement des matériaux bitumineux en vue d'en permettre l'utilisation. Il s'agit des principaux matériaux post-consommation dont l'utilisation est permise ou est en voie de l'être jusqu'à maintenant.

En 2008, environ 244,000 tonnes de verre ont été générées par la société québécoise dont plus de 128,000 tonnes ont été recyclées (Gagné, 2010). À titre de comparaison, lors de l'année 2008 aux États-Unis, environ 2,81 millions des 12,15 millions de tonnes de verre

produites ont été recyclés (23 %) (US Environmental Protection Agency, 2009). Afin de pouvoir réutiliser le verre de post-consommation, il est important de le classer en fonction du type de verre ainsi que de la couleur puisque les différents types de verre ont tous des compositions chimiques différentes (US Environmental Protection Agency, 1992). Cela pose des problèmes au niveau de la réutilisation, car les producteurs qui utilisent du verre de post-consommation ont des exigences précises en ce qui concerne les caractéristiques du verre fabriqué. En effet, si l'on mélange différents types de verre lors de la fabrication de nouveaux produits, la qualité du produit fini n'est pas garantie (Gagné, 2010). Le verre de post-consommation qui ne peut pas être classé en fonction de sa couleur ou bien de son type est classifié comme étant du verre de couleur mixte. Le verre mixte représente plus de 59 % de la quantité totale de verre recyclé (Gagné, 2010). Le verre mixte est jugé non conforme pour le reconditionnement, ce qui veut dire qu'il ne peut pas être utilisé pour la fabrication de nouveau produit de verre. Il convient donc de trouver des sources d'utilisations possibles pour ce matériau.

Le but de cette recherche réalisée au Laboratoire des Chaussées et Matériaux Bitumineux (LCMB) de l'École de Technologie supérieure (ÉTS) est de vérifier la possibilité d'incorporer du verre dans les enrobés bitumineux tout en conservant des caractéristiques équivalentes à celle d'un enrobé conventionnel. Les critères de performances ont été sélectionnés en fonction des exigences de la méthode de formulation du laboratoire des chaussées (LC) du MTQ. Pour ce faire, des essais visant à étudier l'effet du dosage en verre en vue de sélectionner un dosage optimal en particules de verre ont été effectués. Par la suite, des essais comparatifs entre un enrobé de référence et l'enrobé avec dosage optimal en verre ont été réalisés afin d'évaluer et de comparer les performances thermomécaniques, les caractéristiques physiques et la durabilité.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre traite de l'état des connaissances dans le domaine des enrobés bitumineux. Plus spécifiquement, il sera question des méthodes de caractérisation et de formulation des enrobés bitumineux dans le but d'évaluer les impacts de l'incorporation du verre de post-consommation sur le comportement thermomécanique. La revue de la littérature vise à mettre en perspective l'état des connaissances et faire un bilan des recherches déjà effectuées sur le sujet. La revue de la littérature traitera des éléments suivants : le recyclage du verre, la structure d'une chaussée bitumineuse, description des principaux constituants d'un enrobé bitumineux, description des enrobés bitumineux, comportement des enrobés bitumineux dans les structures routières, historique et résultats des expériences portant sur l'incorporation de particules de verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux.

1.1 Le recyclage du verre

Le verre est principalement composé de trois éléments de base, soit l'oxyde de sodium (Na_2O), l'oxyde de calcium (CaO) et le dioxyde de silicium (SiO_2) ou communément appelé silice (Pajean, 2007). Ces trois éléments représentent 95 % de la composition chimique totale des éléments utilisés dans la fabrication de verre. La proportion restante est comblée par des additifs comme l'oxyde d'aluminium ou bien le plomb et dont le choix varie en fonction de l'utilisation prévue du verre. Globalement, il existe quatre types de verres utilisés dans la fabrication de produits. Ces différents types de verre sont présentés dans le Tableau 1.1. La variation de la composition chimique des différents types de verre est problématique au niveau du recyclage et pour cette raison, il est important de procéder à un tri avant de les recycler. À noter que seul le verre de type creux peut-être recueilli au moyen de la collecte sélective municipale. Une fois acheminé au centre de tri, le verre creux est classé en quatre sous-catégories selon la couleur : brun, vert, incolore, mixte. Il arrive souvent que les contenants de verre creux se brisent durant le transport vers les centres de tri. Ainsi, les

particules brisées se mélangent et il est impossible de classer ce verre brisé en fonction de la couleur avec les procédés de tri actuels. Ces particules sont définies comme étant du verre de post-consommation de couleur mixte tel qu'illustré à la Figure 1.1 et représentent plus de 59 % de la quantité totale de verre récupéré au Québec par les divers moyens de collecte (Gagné, 2010).

Tableau 1.1 Utilisations des différents types de verre
Adapté de Gagné (2010)

Types de verre	Utilisations
Verre creux	Industrie alimentaire
Verre plat	Fabrication fenêtres et vitrage
Verre spécialisé	Résistant à différents types d'agression (chimique, chaleur, etc.)
Verre optique	Optométrie, Appareils optiques.



Figure 1.1 Exemple de verre de type mixte concassé

La réutilisation de verre de post-consommation permet de réduire jusqu'à 32% la consommation d'énergie nécessaire à la fabrication de nouveaux produits et par le fait même, la production de gaz à effet de serre (Gagné, 2010). Le verre mixte est jugé non conforme pour la réutilisation, ce qui veut dire qu'il ne peut pas être utilisé pour la fabrication de nouveaux produits. En effet, si l'on mélange différents types de verre, la qualité du nouveau produit n'est pas assurée (Gagné, 2010).

Le prix du verre post-consommation varie beaucoup en fonction du type de verre. Selon Recyc-Québec (2013a), les recycleurs paient en moyenne 33\$ pour une tonne de verre incolore, 15\$ pour le verre brun-vert et facturent des frais de 12\$ par tonne pour le verre mixte. Les centres de tri doivent ainsi payer les entreprises qui recyclent le verre pour se départir du verre mixte. Le verre mixte représente donc une nuisance pour la rentabilité des centres de tri et par le fait même une aubaine pour les entreprises recycleurs.

Le Tableau 1.2 présente les diverses utilisations possibles pour le verre post-consommation. De plus, on y retrouve le potentiel de valeur ajoutée au principe des 3RV (Réduction à la source, Réemploi, Recyclage et Valorisation), le stade de développement du/des projets (en date de 2006) ainsi que la quantité de verre récupéré nécessaire à chacune des utilisations.

Tableau 1.2 Utilisations possible pour le verre mixte de post-consommation
Adapté de Recyc-Québec (2006)

Utilisation	3RV / valeur ajoutée	Stade de développement	Quantité de verre récupéré nécessaire
Laine de verre	Bonne	Marché en développement pour le recyclé.	Concurrence le verre neuf. Marché global de la laine de verre tributaire de la construction.
Abrasion au jet	Moyenne à bonne	Marché en croissance modérée.	Bonnes, mais limités à certaines niches d'application
Golf: trappes de sable	Moyenne	Besoin de vérifier comment se comporte le sable. Besoin de projet pilote.	Limitées
Béton: additif	Moyenne à bonne	De la recherche en laboratoire faite. R&D à compléter.	Élevées
Filtration municipale	Faible à moyenne	R&D à développer et projets pilotes à réaliser. Application à long terme.	Limitées
Filtration pour piscines	Faible à moyenne	En développement et début de commercialisation.	Limitées
Industrie de la peinture	Faible à moyenne	Vérifications avec les fabricants de peinture.	Très limitées
Conditionnement de bardeaux d'asphalte	Faible à moyenne	Vérifications à effectuer.	Très limitées
Substitution d'agrégats	Faible	Projets à développer avec le MTQ. Applications privées rapides. Concassage primaire.	Élevées
Abrasif routier	Faible	Tests faits en 1995 avec le MTQ. Problèmes de plomb à l'époque. Besoin d'actualiser les analyses. Temps de R&D requis.	Élevées
Asphalte: substitution d'agrégats	Faible	Projets pilotes réalisés en dehors du Québec. Projet pilote à réaliser	Élevées
Plastique: utilisation comme charge	Moyenne	Recherche à effectuer.	Moyennes

1.1.1 Disponibilité du verre de post-consommation à l'échelle du Québec

Au Québec, on compte près d'une cinquantaine d'entreprises de récupération du verre (Gagné, 2010). De ce nombre, il y a 33 centres de tri répartis dans les 17 régions administratives du Québec (Recyc-Québec, 2013b). Une dizaine d'entreprises qui recyclent le verre dans de nouveaux produits existent aussi et sont principalement situées dans la région de Montréal (Gagné, 2010).

Étant donné qu'il y a présence de centres de tri sur tout le territoire Québécois habité tel qu'illustré à la Figure 1.2, il est possible d'envisager l'approvisionnement en verre post-consommation à l'échelle du Québec.

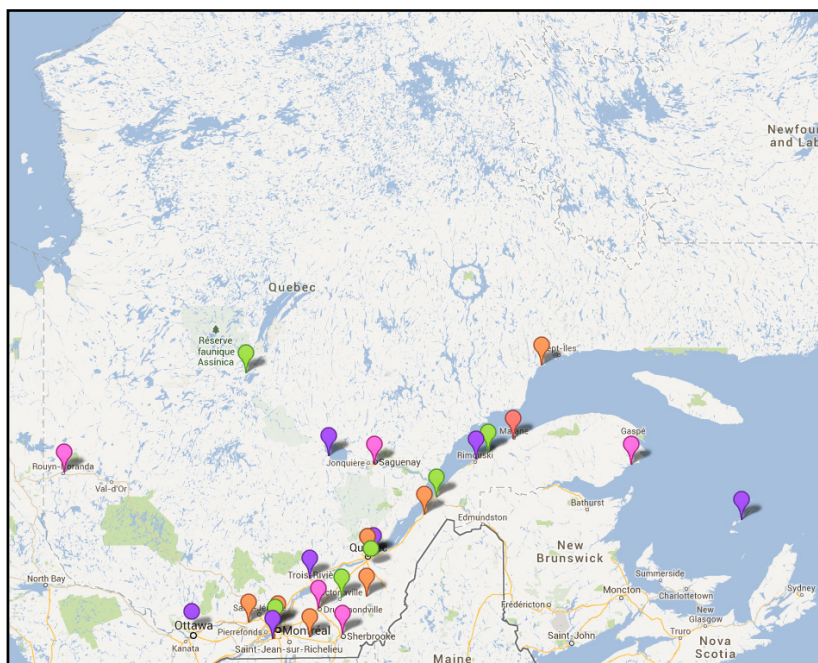


Figure 1.2 Localisation des centres de tri du Québec
(en date de juillet 2013)

1.1.2 Efficacité du processus de recyclage du verre de post-consommation pour la fabrication de nouveaux produits

Pour que le recyclage d'une matière soit rentable, il faut que les coûts associés à la réutilisation de la matière soient inférieurs au coût d'achat de la matière première (US Environmental Protection Agency, 1992). La réutilisation du verre comporte de nombreux avantages comme une économie des coûts d'énergie associés à la production des nouveaux produits de verre ainsi qu'une augmentation de la durée de vie des équipements de fabrication telle que les fournaies (US Environmental Protection Agency, 1992). Étant donné que les températures de fabrication sont moins élevées lorsque l'on utilise une proportion de verre post-consommation dans la fabrication de nouveau produit, l'endommagement des équipements de production est moins important. Les producteurs de

verre s'entendent pour dire que la réutilisation du verre est bénéfique pour l'industrie et qu'ils sont prêts à en acheter autant qu'il est possible (US Environmental Protection Agency, 1992). Par contre, la source de verre doit être classée en fonction de la couleur et exempt de contamination ce qui représente un grand défi au niveau de la récupération.

1.1.3 Problématique environnementale liée au recyclage du verre de post-consommation

Lorsque stocké en pile, le verre ne représente pas de risques majeurs pour l'environnement dans la mesure où de simples précautions sont prises (Imteaz, Ali et Arulrajah, 2012). Le lixiviat obtenu lors de la percolation de l'eau dans des débris de verre ne présente aucune contamination due à la nature du verre. C'est plutôt les détritiques présents dans les débris de verre qui posent problème puisqu'il est très difficile d'en connaître la nature avec exactitude. Des métaux lourds sont présents dans la structure chimique du verre, mais ceux-ci ne migrent pas hors du verre, et ce, même après concassage. Afin de vérifier le potentiel de dangerosité du verre, des tests ont été effectués sur plusieurs échantillons lavés soit à l'eau, à l'acide ou bien avec une base. Les résultats obtenus ont montré qu'il n'y avait aucun danger lié à l'utilisation ou bien le stockage en pile du verre à une exception près (Imteaz, Ali et Arulrajah, 2012). Le lixiviat provenant des échantillons lavés à l'acide avait des concentrations en fer au-dessus des limites permises. Cela pourrait être problématique si du solvant entrainé en contact avec le verre stocké en pile. Une attention particulière doit donc être portée lors du stockage du verre surtout dans un endroit où des solvants sont présents. Si toutes les normes et consignes de sécurité sont respectées lors de la fabrication et la pose d'un enrobé avec verre, il n'y a aucun danger supplémentaire relié à l'utilisation de ce matériau par rapport aux enrobés conventionnels (Day et Schaffer, 1989).

1.2 La structure d'une chaussée bitumineuse

Le rôle d'une chaussée est de rendre la circulation confortable et sécuritaire pour les usagers. La structure d'une chaussée est composée de plusieurs matériaux où chacun a un rôle à jouer (Figure 1.3).

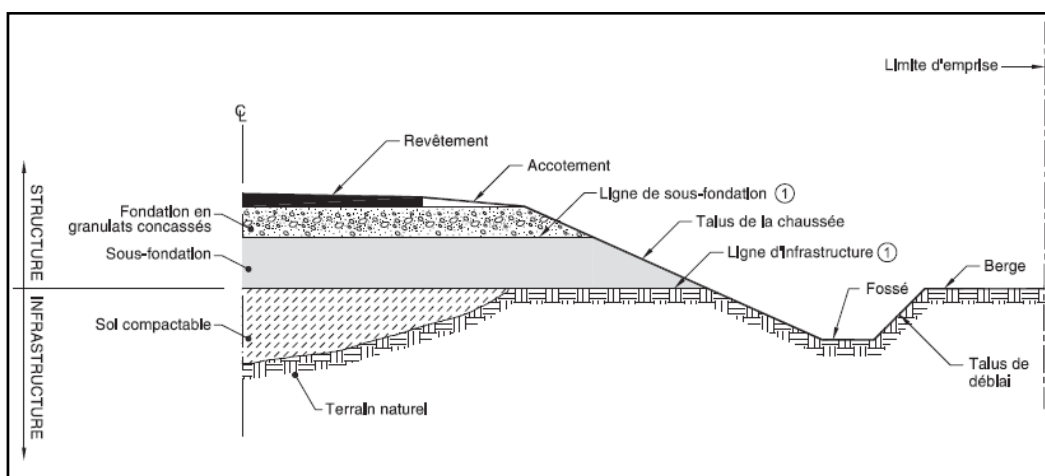


Figure 1.3 Coupe type d'une structure de chaussée
Adaptée du dessin normalisé 01
(Ministère des Transports du Québec, à jour au 30 janvier 2013)

La structure d'une chaussée permet au sol d'infrastructure de résister aux contraintes induites par le passage des véhicules. L'assise de la chaussée comprend deux éléments, soit la sous-fondation et la fondation. Généralement composés de matériaux granulaires, leurs rôles est de protéger le sol support de la pénétration du gel et de répartir les pressions sur le sol afin d'éviter l'apparition de déformations permanentes (Di Benedetto et Corté, 2005).

Le revêtement d'une chaussée peut être composé d'une ou de plusieurs couches. La qualité d'une chaussée est fortement tributaire de la qualité du revêtement utilisé malgré le fait que son rôle structurel soit secondaire. Le choix du type de revêtement doit être faits selon plusieurs caractéristiques qu'il est possible de regrouper sous quatre catégories : 1) Sécurité et confort aux usagers, 2) Maintien de l'intégrité de la structure, 3) Impact sur

l'environnement ambiant par rapport à l'émission de bruit, 4) Possibilités de régénération des caractéristiques de surfaces (Faure, 1998).

La majorité des chaussées au Québec sont construites avec un revêtement de type enrobé bitumineux constitué d'une ou plusieurs couches. Dans les systèmes multicouches, on retrouve généralement une couche de surface installée sur une couche de base. Dans certains cas, on retrouve en plus une couche de liaison qui est installée entre la couche de surface et la couche de base.

Sur le réseau routier géré par le ministère des Transports du Québec (MTQ), la proportion de chaussées revêtues avec revêtement en enrobé bitumineux est de 96 % (Ministère des Transports du Québec, 2012). Les revêtements d'enrobés bitumineux sont les plus utilisés puisqu'ils possèdent de multiples qualités : 1) recyclable à 100 %, 2) rapidité de construction, 3) alternative économique par rapport aux chaussées de béton, 4) environnement silencieux (Bitume Québec, 2008).

1.2.1 Type de sollicitations d'une chaussée bitumineuse

Une chaussée est soumise à deux sources de sollicitations majeures soit : 1) passage des véhicules (effet du trafic), 2) variation de température (effet thermique) (Di Benedetto et Corté, 2005). Ces sources de sollicitations ont un impact beaucoup plus important sur la chaussée que les sollicitations liées au vieillissement ou bien à l'effet de l'eau.

1.2.1.1 Effet du trafic

Lors du passage d'un véhicule, chaque couche de la chaussée subit des compressions et des flexions. La Figure 1.4 schématise les sollicitations induites par la circulation des véhicules dans les différentes couches de la chaussée.

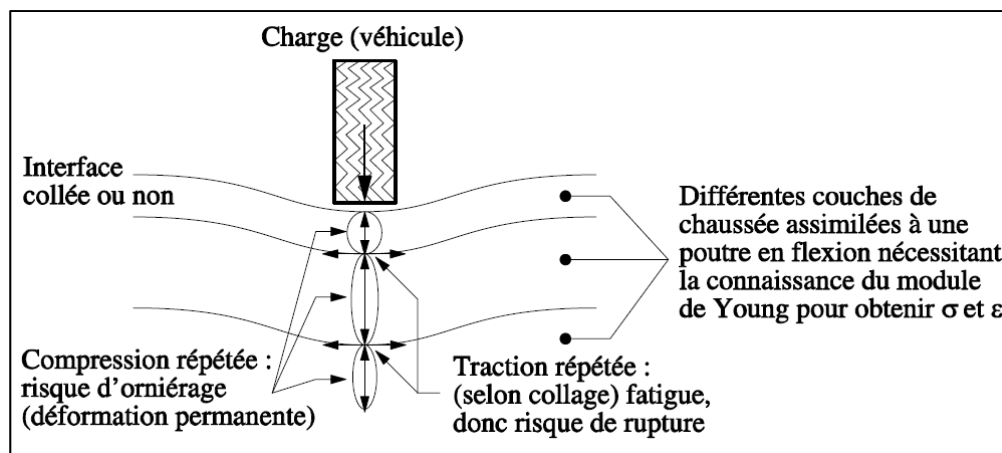


Figure 1.4 Schématisation des sollicitations dans une chaussée
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

La répétition du passage des véhicules engendre des petites tractions à la base des couches créant ainsi des microdégradations qui vont éventuellement entraîner la fissuration du revêtement et d'autres dégradations dans la chaussée (Meunier, 2012). De plus, les compressions répétées par le passage des véhicules peuvent créer des déformations permanentes. L'accumulation de ces déformations dans la chaussée est définie comme étant de l'orniérage (Di Benedetto et Corté, 2005).

1.2.1.2 Effet de la température

Selon Di Benedetto et Corté (2005), la température est à l'origine de deux mécanismes distincts qui influencent la rhéologie d'un matériau bitumineux :

1. Variation de la rigidité. Puisque les enrobés bitumineux sont thermosensibles, leur comportement mécanique varie en fonction de la température. À haute température, un enrobé devient généralement moins rigide;
2. Création de contraintes internes. Lors des changements de températures, le matériau subit des contractions et dilatations qui engendrent l'apparition de contraintes dans le corps du matériau (Figure 1.5).

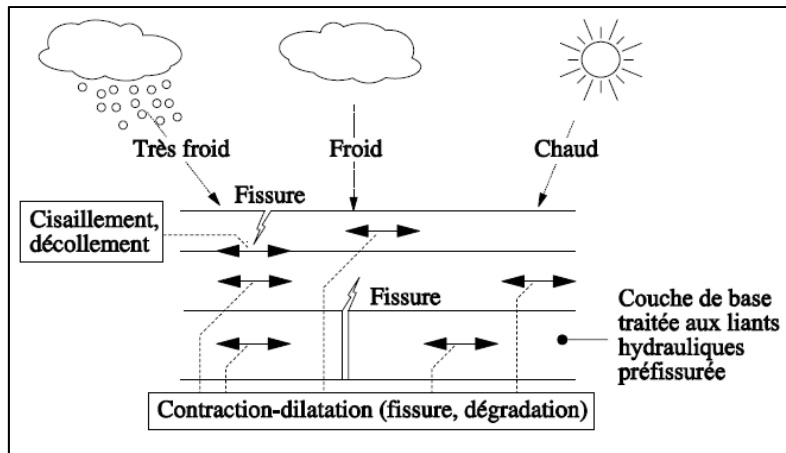


Figure 1.5 Illustration des dommages dus à la variation de température
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

Le deuxième élément est particulièrement néfaste, car il est responsable de l'apparition de fissuration dans l'enrobé. En effet, en présence de températures très basses, des fissures peuvent apparaître et se propager avec les cycles de variations de température (Di Benedetto et Corté, 2005).

1.3 Principaux constituants des enrobés bitumineux

Un enrobé bitumineux est un mélange uniforme généralement composé de 95 % (% massique) de granulats et de 5 % de bitume (Di Benedetto et Corté, 2004). Les pourcentages de chacun des constituants varient en fonction du type d'enrobé confectionné.

1.3.1 Granulats

Selon Di Benedetto et Corté (2004), les granulats sont définis comme étant « *l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées* ». Il est possible par concassage et tamisage d'obtenir des granulats d'une multitude de forme et de dimensions. Généralement, on classe les granulats selon deux catégories : 1) granulat d'origine naturelle, 2) granulat d'origine artificielle. Les granulats d'origine naturelle proviennent soit des carrières, des sablières ou bien des gravières et ont subi seulement des transformations mécaniques. Les granulats

d'origine artificielle sont ceux qui proviennent de sous-produits industriels (scories d'aciers), du recyclage des chaussées (granulats bitumineux recyclés - GBR) ou bien qui sont fabriqués et destinés à un usage bien précis (fibres synthétiques).

1.3.1.1 Porosité d'un granulat

Un granulat est un ensemble de particules. Chaque particule est composée d'une phase solide et de vides remplis d'air et/ou d'eau (Perraton, 2012). La porosité d'une particule est définie comme étant le rapport entre le volume des vides et le volume total de la particule (vides + solides). On peut regrouper les différents types de vides sous deux catégories : 1) vides perméables, 2) vides imperméables. La Figure 1.6 schématise les différents types de vides d'une particule.

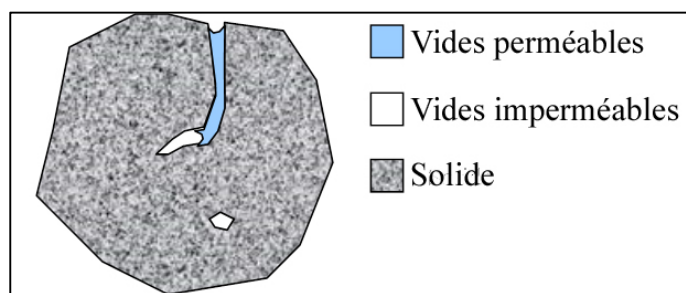


Figure 1.6 Schématisation des vides d'une particule
Tirée de Perraton (2012)

Les vides perméables d'une particule sont définis comme des pores ouverts pouvant être remplis d'un fluide (Perraton, 2012). L'absorption d'une particule correspond à la masse de liquide occupant ses vides perméables. À noter que la proportion de vides perméables varie en fonction de la viscosité du fluide d'infiltration utilisé (Perraton, 2012).

1.3.1.2 Nature pétrographique des particules de granulats

La majorité des particules sont composées de plusieurs minéraux qui présentent des caractéristiques différentes. La nature pétrographique concerne la composition chimique et

minéralogique et influence les performances à court terme (friabilité, adhésivité) et à long terme (polissage, délitage) des différentes particules (Di Benedetto et Corté, 2005).

L'adhésivité du bitume aux différentes particules utilisées pour la confection d'un enrobé est fort complexe. L'adhésion du bitume à une particule va dépendre notamment: 1) de l'énergie d'interface, 2) des forces de surface et, 3) du potentiel d'encrage lié à la rugosité et la porosité de la particule. L'utilisation de particules de verre dans l'enrobé porte à réflexion quant à la qualité du lien qui peut se développer avec le bitume. Notons que la teneur en silice d'une particule (SiO_2) influence l'affinité entre celle-ci et le bitume (Di Benedetto et Corté, 2005). Les particules ayant une teneur en silice supérieure à 65 % sont considérées comme étant acides alors que celles ayant une teneur inférieure à 55 % sont considérées comme étant de nature basique. Les particules ayant une forte teneur en silice présentent généralement une moins bonne affinité avec le bitume.

1.3.1.3 Caractéristiques géométriques des granulats

Dans une chaussée, le rôle du squelette minéral est de transmettre et redistribuer les charges dans la structure de la chaussée et sur le sol d'infrastructure par le biais du contact entre les granulats (Di Benedetto et Corté, 2004). Les caractéristiques géométriques d'une particule comme sa forme, son degré d'angularité, son état de surface ainsi que sa dureté et ses arêtes augmentent les frictions entre les particules et contribuent à limiter le déplacement ou la rotation de celles-ci (Di Benedetto et Corté, 2004).

1.3.1.4 Vérifications des performances des granulats

Afin de s'assurer de la conformité et de la performance des particules comme granulat dans les matériaux de chaussées, on vérifie entre autres les deux propriétés intrinsèques suivantes : 1) résistance à l'abrasion par l'essai *Los Angeles* (LC 21-400), 2) résistance à l'usure par attrition au moyen de l'essai *Micro-Deval* (LC 21-070). D'autres caractéristiques des granulats qui dépendent du mode de fabrication sont aussi vérifiées comme le pourcentage de particules fracturées du gros granulat (LC 21-100), la proportion de particules plates et

allongées (LC 21-265) et la friabilité (LC 21-080). La teneur en particules de formes plates et allongées est une caractéristique importante, car ces particules sont plus susceptibles à la fragmentation lors de la fabrication de l'enrobé, de la mise en place ainsi que sous l'effet du trafic (Di Benedetto et Corté, 2004).

1.3.2 Liant bitumineux

Le bitume provient de la distillation du pétrole et il s'agit du liant le plus utilisé dans la confection des enrobés bitumineux puisqu'il possède un haut pouvoir agglutinant. Le rôle du bitume est d'enrober les particules et de permettre la cohésion et l'imperméabilité de l'enrobé. Même si la proportion de bitume est faible comparativement à celle du granulat, les caractéristiques du bitume influencent de façon importante les variations de rigidité de l'enrobé induites par les sollicitations du trafic et de la température (Di Benedetto et Corté, 2004).

1.3.2.1 Composition chimique du bitume

Le bitume est un hydrocarbure composé de plusieurs éléments chimiques et dont la proportion de chacun des éléments varie en fonction de l'origine du brut, du mode de fabrication ainsi que de divers facteurs comme le grade du bitume ou bien l'état de vieillissement (Di Benedetto et Corté, 2004). Le Tableau 1.3 présente les proportions des éléments chimiques retrouvés dans un bitume.

Tableau 1.3 Composition chimique des bitumes
Tiré de Di Benedetto et Corté (2004)

Élément	Concentration en % en masse
Carbone	82-88
Hydrogène	8-11
Soufre	0-6
Oxygène	0-1,5
Azote	0-1

La proportion des différents éléments chimiques d'un bitume dicte en partie les propriétés de celui-ci. On regroupe les différents éléments sous quatre familles chimiques: 1) asphaltènes, 2) résines, 3) aromatiques, 4) saturés (Di Benedetto et Corté, 2004) . La détermination de la proportion de chacune des familles chimiques se fait en isolant par précipitation les asphaltènes, composé insoluble dans l'heptane, des maltènes, composé soluble. L'heptane est un hydrocarbure de faible poids moléculaire. On sépare ensuite les maltènes en trois familles chimiques soit les résines, les aromatiques et les saturés, tous des composés solubles dans l'heptane. La méthode couramment employée pour cette séparation est la chromatographie sur gel de silice ou d'alumine (Di Benedetto et Corté, 2004).

Les asphaltènes

Les asphaltènes sont des solides amorphes, de couleur noire ou brune et de nature très polaires (Di Benedetto et Corté, 2004). Ils contiennent du carbone, de l'hydrogène, de l'azote, du soufre et de l'oxygène. La teneur en asphaltènes a une grande incidence sur le comportement rhéologique du bitume. En effet, une augmentation de la teneur en asphaltènes donne un bitume plus dur, plus visqueux, de plus faible pénétration et avec un point de ramollissement plus élevé (Shell, 1995). En d'autres mots, ce sont les asphaltènes qui sont responsables de la rigidité et de la résistance du bitume (Young et coll., 1998). Ils composent généralement de 5 à 25 % des composés chimiques d'un bitume (Di Benedetto et Corté, 2004).

Les résines

Les résines sont composées d'hydrogène, de carbone et de faibles quantités d'oxygène, de soufre et d'azote (Shell, 1995). Ce sont des composés très polaires ce qui fait en sorte que les résines ont un fort pouvoir adhésif (Shell, 1995). Ce sont ces composés qui sont responsables de l'adhésivité et de la ductilité du bitume (Young et coll., 1998). Les résines agissent comme agent dispersant pour les asphaltènes de sorte que leur proportion dicte la structuration du bitume. Généralement, la teneur en résine des composés chimiques d'un bitume varie entre 13 et 25 % (Di Benedetto et Corté, 2004).

Les aromatiques

Les aromatiques sont des liquides brun-noir et qui contiennent une grande quantité de carbone, d'hydrogène et de soufre (Di Benedetto et Corté, 2004). Ils représentent la plus grande proportion de la phase dispersée du bitume et sont les principaux composés du bitume, soit de 40 à 65 % (Shell, 1995).

Les saturés

Les saturés sont principalement composés de carbone, d'hydrogène et on retrouve quelques traces des autres éléments (Di Benedetto et Corté, 2004). Les saturés sont des huiles non visqueuses, non polaires et blanches. Leur proportion varie entre 5 et 20 % (Shell, 1995). Ces composés sont responsables de la viscosité et de la fluidité du bitume (Young et coll., 1998).

1.3.2.2 Structuration du bitume

On considère la structure d'un bitume comme un système colloïdal composé de deux phases : 1) phase de dispersion (continue), 2) phase dispersée (discontinue). Les asphaltènes sont considérés comme la phase dispersée tandis que les maltènes comme la phase dispersante. Il est possible de classer les bitumes selon trois catégories de structuration : *sol*, *gel*, *sol-gel* (Young et coll., 1998).

Une micelle est décrite comme étant une particule formée d'un amas de petites molécules en suspension dans un fluide. Pour un bitume, lorsqu'il y a présence d'une quantité suffisante de résines et d'aromatiques avec un pouvoir solvant adéquat, les asphaltènes sont complètement dispersés et les micelles formées ont une bonne mobilité dans le bitume (Di Benedetto et Corté, 2004). Ce type de bitume est nommé *sol*. On dit de ces bitumes que les asphaltènes sont peptisés. Par contre, lorsque la quantité de résines et d'aromatiques est insuffisante ou bien que leur pouvoir solvant n'est pas suffisant, les asphaltènes se regroupent pour former des floccs. Ce type de bitume est nommé *gel*. De façon générale, les bitumes présentant une structuration intermédiaire des asphaltènes sont nommés *sol-gel* (Shell, 1995).

Le degré de dispersion des asphaltènes a une influence importante sur la viscosité d'un bitume. Les bitumes de type *sol* ont des viscosités plus faibles que les bitumes de type *gel*. Par contre, cette différence de viscosité peut disparaître avec une augmentation de la température. En effet, selon Di Benedetto et Corté (2004), « *le caractère gel de certains bitumes peut disparaître quand ils sont chauffés à haute température* ».

1.3.2.3 Classification des bitumes

Pour classer les bitumes, on cherche à quantifier la cohésion en fonction de températures de référence (méthode européenne) ou bien à déterminer des plages de température pour des niveaux de cohésion de référence (méthode SHRP « *Strategic Highway Research Program* ») (Touhara, 2012). Au Québec, les bitumes sont classés selon la méthode SHRP.

Pour les deux approches présentées, les propriétés du bitume sont établies suivant des méthodes de conditionnement qui ont pour but de simuler l'évolution du comportement rhéologique du bitume tout au long du processus de fabrication et de service (Touhara, 2012).

1.3.2.4 Rhéologie du bitume

Étant donné que le bitume est thermosensible et qu'il présente un comportement viscoélastique, son comportement est principalement influencé par la température et le temps de charge. On définit cela comme étant la susceptibilité thermique et la susceptibilité cinétique du bitume.

Selon la température, le bitume peut présenter un comportement fragile ou ductile (Figure 1.7). À haute température (au-delà de 80°C), le bitume se comporte principalement comme un fluide newtonien (Di Benedetto et Corté, 2004). Le temps de chargement ne change pas la consistance du bitume, mais dicte l'amplitude de la déformation.

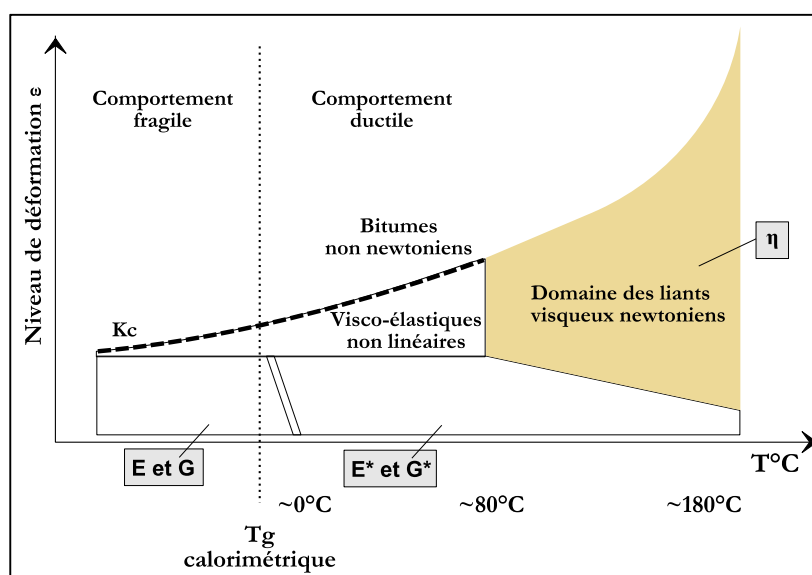


Figure 1.7 Comportement du bitume en fonction de la température
Tirée de Di Benedetto et Corté (2004)

1.3.3 Utilisation de matériaux post-consommation comme constituant dans les enrobés

Le recyclage de matériau de post-consommation dans les enrobés permet de diminuer l'utilisation de matériaux vierges, la quantité de rebus produits ainsi que la quantité de gaz à effet de serre rejeté. À ce jour, les principaux matériaux de post-consommation dont

l'utilisation est permise sont les granulats bitumineux recyclés (GBR) ainsi que les particules de bardeau d'asphalte de post-fabrication (BPF). Le Tableau 1.4 présente les différents dosages des matériaux post-consommation permis ainsi que leur domaine d'application :

Tableau 1.4 Domaine d'application et dosage des matériaux de post-consommation
Tiré de Québec (2013)

Type de matériau	Dosage maximal	Application
Granulats bitumineux recyclés (GBR)	10 %	Couche de surface, bretelles, collecteurs et accotements d'autoroutes
Granulats bitumineux recyclés (GBR)	20 %	Sur l'ensemble du réseau excepté les surfaces où un dosage maximal de 10 % est prescrit
Particules de bardeaux d'asphalte post-fabrication (BPF)	5 %	Enrobé utilisé en couche de base
	3 %	Enrobé utilisé en couche de surface (DJMA < 10,000)
Particules de bardeaux d'asphalte post-consommation	S.O.	Projets pilotes en cours

1.4 Description des enrobés bitumineux (EB)

Il est possible de distinguer différents types d'EB en se référant à la manière dont le liant est incorporé (Di Benedetto et Corté, 2005). Les trois types d'enrobés sont : 1) enrobés à chaud, 2) enrobés à froid traités à l'émulsion ou mousse de bitume, 3) enrobés de traitement de surface. Au Québec, la majorité des EB à froid incorporent un liant hydraulique, moins de 1,5%, comme le ciment. Cet ajout permet à l'EB à froid d'obtenir une rigidité accélérant la mise en service de l'ouvrage. Dans le cadre de ce projet, seul un EB à chaud a été étudié.

Les différents types d'EB peuvent aussi être présentés en fonction de la nature des couches de la chaussée où ils se trouvent (Di Benedetto et Corté, 2005) : 1) couche d'assise (inclut les couches de fondations et de base), 2) couche de surface (inclut couche de liaison et de roulement). Dans le cadre de ce projet, l'EB étudié est de type ESG14 et peut être utilisé en couche de base ou bien en couche unique.

1.4.1 Différents types d'enrobés bitumineux

Au Québec, il existe plusieurs EB pouvant répondre à diverses applications. Le MTQ donne des spécifications relatives à chaque EB dans la norme 4202 (Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du laboratoire des chaussées). Parmi les spécifications, on retrouve les éléments suivants : granularité du combiné granulaire (fuseau granulométrique et zone de restriction), volume de bitume effectif (bitume non absorbé par les granulats), indice des vides, résistance à l'orniérage et tenue à l'eau. Ces spécifications sont liées à des critères de mise en œuvre (aptitude au compactage à la PCG), de stabilité (résistance à l'orniérage) et de durabilité (tenue à l'eau).

La nomenclature utilisée pour nommer un EB désigne le type de granularité ainsi que la grosseur nominale maximale (GNM). Dans le cadre de ce projet, l'EB utilisé est un ESG14 ayant une texture de surface semi-grenue et une GNM de 14 mm.

1.4.2 Principe de la formulation des enrobés bitumineux

La formulation d'un EB consiste à déterminer la proportion de chacun des constituants du mélange, soit la composition granulométrique ainsi que la teneur en bitume (Di Benedetto et Corté, 2005). Lorsque l'on procède au développement d'une formule d'EB, en général le gain en performance d'une propriété se fait au détriment d'une autre. Le but de la formulation est donc d'optimiser le mélange afin de trouver le bon compromis tout en répondant aux besoins ciblés.

La composition de l'enrobé est obtenue suite à un processus d'étude qui comprend une série d'essais qui visent à évaluer les caractéristiques reliées aux propriétés recherchées une fois la chaussée mise en service. La formulation d'un EB est ainsi séparée en deux phases (Di Benedetto et Corté, 2005) :

1. Détermination de la composition granulométrique ainsi que la teneur en bitume. L'objectif de cette phase est de trouver les proportions des constituants assurant la durabilité de l'EB ainsi qu'une maniabilité permettant de respecter les critères de compaction;
2. Vérification des performances par le biais d'essais mécaniques. Le but de cette phase est de vérifier le comportement de l'enrobé par rapport à des propriétés d'usages ciblées et normalisées.

1.4.3 Méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées (LC)

Au Québec, la méthode de formulation utilisée est celle du Laboratoire des Chaussées (LC) du MTQ. Le but de cette méthode est de formuler un EB ayant la teneur en bitume la plus élevée possible tout en maintenant une bonne résistance à l'orniérage (Perraton, 2012). Cette méthode de formulation est basée sur une étude volumétrique des constituants de l'enrobé et fixe un volume de bitume effectif (V_{be})¹ et des spécifications par rapport à la teneur en vides interstitiels (V_i)² pour chaque EB. L'aspect volumétrique permet de prendre en considération les différences de densité entre les matériaux utilisés et facilite ainsi la comparaison entre les différents EB (Lamothe, 2004). Pour faciliter le travail en laboratoire ainsi qu'en usine, les proportions volumiques sont converties en masses pour la fabrication de l'EB (Langlois, 2005). La Figure 1.8 illustre la distribution volumétrique des constituants d'un EB compacté. Ces éléments sont décrits plus en détail dans les sections suivantes.

¹ Le volume de bitume effectif correspond à la quantité de bitume non absorbé par les particules. Une description plus détaillée est présentée à section 1.4.3.4.

² Les vides interstitiels correspondent aux vides dans l'enrobé. Une description plus détaillée est présentée à section 1.4.3.1.

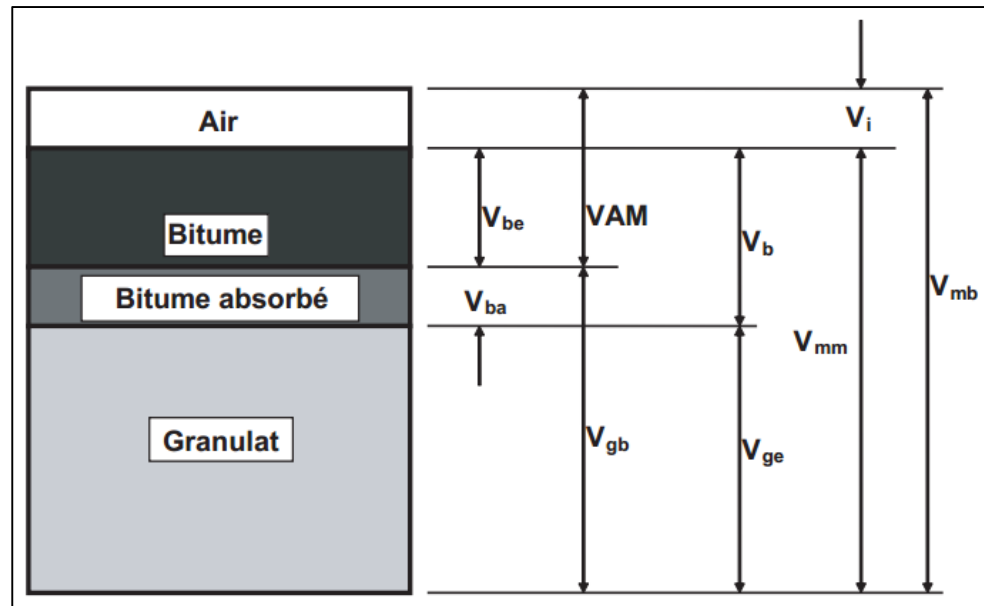


Figure 1.8 Diagramme des phases
Tirée de Perraton (2012)

Où les paramètres sont les suivants :

V_{mb}	→	volume brut de l'enrobé;
V_i	→	volume des vides interstitiels;
V_{mm}	→	volume maximal de l'enrobé (sans les vides interstitiels);
V_b	→	volume total de bitume;
V_{ge}	→	volume du granulat effectif;
VAM	→	volume des vides intergranulaires (entre les particules du granulat);
V_{gb}	→	volume du granulat brut;
V_{be}	→	volume de bitume effectif;
V_{ba}	→	volume de bitume absorbé.

1.4.3.1 Les vides interstitiels (V_i)

Les vides interstitiels jouent un rôle très important dans le comportement mécanique d'un EB. Une baisse des vides interstitiels améliore la durabilité, la résistance à l'orniérage, la résistance au gel-dégel ainsi que l'imperméabilité de l'EB (Lamothe, 2004). La quantité de vides interstitiels présents dans un EB est définie comme étant la teneur en vides et s'exprime en pourcentage par rapport au volume total. La teneur en vides des EB est établie en laboratoire par un essai réalisé avec la presse à cisaillement giratoire (PCG). Cet outil permet de faire évoluer la teneur en vides en fonction du nombre de cycles de pétrissage. Le Tableau 1.5 résumé les exigences par rapport à l'essai de PCG.

Tableau 1.5 Exigences relatives à l'essai à la presse à cisaillement giratoire
Tiré de Perraton (2012)

Critères	N_{initial}	N_{design}	N_{maximum}
Valeurs	10	Variable (en fonction de l'EB testé)	200
Signification	Correspond au niveau de compaction à la sortie de la paveuse	Correspond au niveau de compaction finale suite au passage des équipements de compaction	Correspond au niveau de compaction à la fin de la durée de vie de l'enrobé bitumineux
Spécifications	$\geq 11 \%$	4 – 7 %	$\geq 2 \%$ sans ressuage

Il est important de noter qu'il existe une différence entre la teneur en vides mesurée en laboratoire et celle mesurée en chantier suite à la mise en place avec les équipements de compactage usuels. En effet, le mode de compactage en laboratoire à la PCG est une combinaison d'un cisaillement giratoire et d'une force axiale cyclique tandis qu'en chantier le mode de compactage est de type pétrissage (rouleau pneumatique) ou bien dynamique (vibrant). C'est pourquoi la PCG est considérée comme un outil de formulation qui permet d'évaluer l'aptitude au compactage d'un EB et non de reproduire les conditions réelles de mise en place.

1.4.3.2 Le volume de granulat brut (V_{gb}) vs volume de granulat effectif (V_{ge})

Le volume d'un granulat brut (V_{gb}) est considéré comme étant le volume d'un granulat en incluant les vides perméables et imperméables des particules. Le volume du granulat effectif (V_{ge}) est considéré comme étant le volume d'un granulat, mais en excluant les vides des particules perméables au bitume. Dans la pratique, le V_{ge} d'un enrobé est trouvé avec l'essai de densité maximale. Le V_{gb} et V_{ge} sont des données importantes pour la formulation d'un EB, car elles permettent de calculer la quantité de bitume absorbé par les particules du granulat.

1.4.3.3 Les vides intergranulaires (VAM) et les vides comblés par le bitume (VCB)

Les vides intergranulaires (VAM) sont caractérisés par l'espace entre les particules du granulat dans un EB compacté. Le VAM correspond aux vides interstitiels (V_i) et au volume de bitume effectif (V_{be}). Le rapport entre le V_{be} et les VAM est exprimé sous la forme de vides comblés par le bitume (VCB) et représente la proportion des vides du granulat (VAM) remplis par du bitume (Langlois, 2005).

Malgré le fait qu'il n'y ait pas d'exigences relatives aux VAM et VCB dans la méthode LC, ces deux paramètres ont une très grande influence sur les caractéristiques d'un EB. L'orniérage d'un EB est directement relié à la proportion de VCB. Dans bien des cas, plus le VCB est élevé, plus l'EB sera sensible à l'orniérage. Cette constatation est toutefois plus ou moins réelle dans le cas des enrobés à matrice de pierre, c'est-à-dire les EB dont le squelette granulaire présente un fort contact pierre sur pierre après compaction. À l'inverse, plus le VCB est faible, plus l'EB sera difficile à compacter (Lamothe, 2004).

1.4.3.4 Le volume de bitume effectif (V_{be})

Comme la méthode de formulation LC tient compte de l'aspect volumétrique des constituants, la teneur en bitume effective est exprimée en volume de bitume effectif (V_{be}). Ce volume de bitume effectif représente tout le bitume qui n'est pas absorbé par les pores des granulats. Le bitume effectif d'un EB assure les fonctions suivantes (McLEOD, 1956):

- agent de liaison et de cimentation;
- stabilité de l'enrobé sous chargement et opposition à la déformation;
- responsable de la plasticité de l'enrobé et de l'ouvrabilité nécessaire à la mise en place et au compactage;
- influence la durabilité de l'enrobé;
- remplis une partie du volume libre entre les particules des granulats (VAM).

Le V_{be} est donc un paramètre déterminant sur le comportement d'un EB et dans la méthode LC, le V_{be} est normalisé pour chacun des EB.

1.4.3.5 Le volume de bitume absorbé (V_{ba})

Les particules utilisées comme granulat dans la confection des EB possèdent, dans la majorité des cas, des vides perméables faisant en sorte qu'une partie du bitume est absorbée par le granulat. Selon McLEOD (1956), le bitume absorbé ne joue aucun rôle dans le comportement d'un EB. La notion de teneur en bitume effective est ainsi apparue.

Par contre, selon McRae (1960), il est important de tenir compte du bitume absorbé. La variation de pression et de température agit sur le bitume absorbé ce qui engendre une dilatation ou bien une contraction de ce dernier. Ce phénomène peut avoir un impact important sur la durabilité de l'EB.

Selon Lamothe (2004), plus un granulat est absorbant, plus l'adhérence entre celui-ci et le liant est grande ce qui favorise la résistance à l'orniérage. Bien entendu, cela est valide dans la mesure où la qualité du bitume est valable.

1.5 Comportement des enrobés bitumineux dans les structures routières

Le comportement d'un enrobé bitumineux est fort complexe. Selon Di Benedetto et Corté (2005), il est possible de regrouper le comportement des EB sous quatre catégories en considérant l'amplitude des déformations observées ($|\epsilon|$) ainsi que le nombre de cycles de chargements (N) :

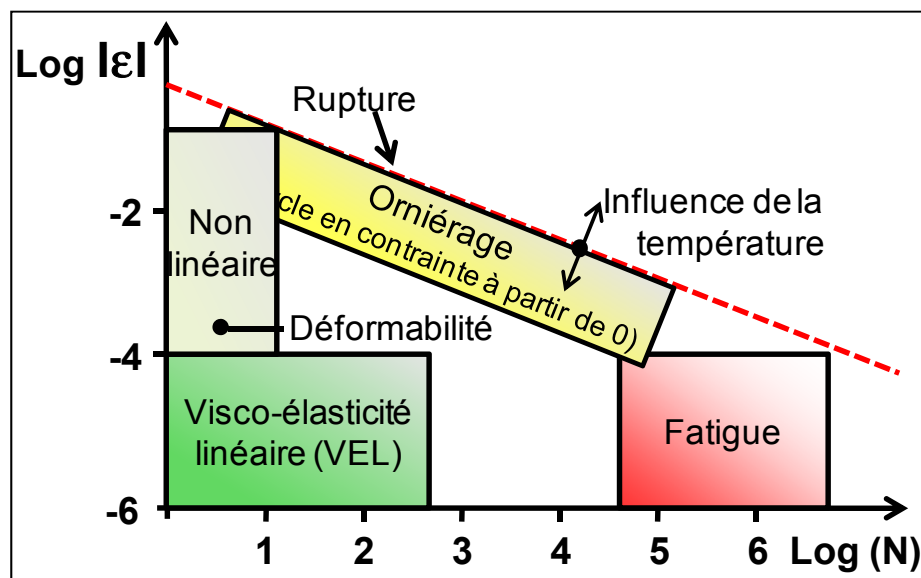


Figure 1.9 Catégories de comportement des enrobés bitumineux
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

1. Comportement non linéaire → observé pour un faible nombre de chargements et de moyenne/grande amplitude de déformations;
2. Comportement viscoélastique linéaire → observé pour de faibles amplitudes de déformations (inférieure à 10^{-4} m/m) et quelques centaines de cycles de chargements;
3. Comportement en fatigue → observé pour plusieurs dizaines de milliers de cycles ainsi que de faibles amplitudes de déformations;

4. Comportement irréversible → caractérisé par l'accumulation des déformations permanentes dont l'amplitude est près du point de rupture du matériau;

Lors du dimensionnement d'une structure de chaussée routière, il faut tenir compte de l'effet du trafic et de la température puisque ces deux éléments ont un impact sur le comportement des EB, plus précisément sur les propriétés thermomécaniques de ces matériaux. Selon Di Benedetto et Corté (2005), il importe de considérer et de caractériser les quatre propriétés thermomécaniques (TM) d'usage suivantes des EB :

1. Module complexe → mesure de la rigidité du matériau vis-à-vis la température et la vitesse de chargement;
2. Résistance à l'orniérage → mesure de l'évolution des déformations permanentes vis-à-vis le nombre de cycles de chargements;
3. Résistance à la propagation de fissures → mesure de la capacité du matériau à résister à la propagation de fissures notamment à basse température;
4. Caractérisation de la fatigue → mesure de la dégradation d'un matériau soumis à un grand nombre de cycles de sollicitations.

1.5.1 Viscoélasticité linéaire

Le concept de module complexe d'un EB vise à quantifier la rigidité de ce matériau. Le principe consiste à mesurer les contraintes engendrées dans une éprouvette d'EB soumise à un déplacement cyclique à fréquence et température variables. Les mesures sont réalisées dans le domaine des petites déformations afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire du matériau (Di Benedetto et Corté, 2005).

Les EB sont des matériaux possédant un comportement TM viscoélastique. Lorsque les charges sont appliquées très rapidement, l'EB présente un comportement fortement élastique, tandis que lorsque les charges sont appliquées lentement, l'EB présente un comportement fortement visqueux (Di Benedetto et Corté, 2005). De plus, la température est aussi un

paramètre qui modifie le comportement de l'EB. On dit ainsi que l'EB est thermosensible. À basse température, l'EB présente une rigidité élevée tandis qu'à haute température, l'EB présente une rigidité faible (Di Benedetto et Corté, 2005). Pour un matériau viscoélastique, la réponse à une sollicitation de type sinusoïdale est aussi de type sinusoïdale mais accuse un retard que l'on nomme déphasage (Di Benedetto et Corté, 2005). Pour les EB, la mesure de la rigidité avec un chargement de type sinusoïdal analysé selon la fréquence et la température est définie comme étant le module complexe (Di Benedetto et Corté, 2005). Le module complexe d'un EB se caractérise par la norme du module complexe, ainsi que l'angle de phase (Carter et Perraton, 2002).

Le module complexe (E^*) peut être décomposé à fin d'analyse. La norme du module complexe ($|E^*|$) correspond au rapport entre l'amplitude de contrainte sinusoïdale et l'amplitude de déformation sinusoïdale (1.1). La norme du module complexe est aussi appelée module dynamique. Par ailleurs, étant donné le comportement viscoélastique des EB, la réponse du matériau sous sollicitation est caractérisée par un angle de phase (ϕ). L'angle de phase (ϕ) varie entre 0° pour un matériau purement élastique et 90° pour un matériau purement visqueux (Carter et Perraton, 2002).

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\phi(\omega)} = |E^*| e^{i\phi(\omega)} \quad (1.1)$$

Où les paramètres sont les suivants :

E^*	→	module complexe;
$ E^* $	→	norme du module complexe; $ E^* = (E_1^2 + E_2^2)^{1/2}$
σ_0	→	amplitude de contrainte;
ε_0	→	amplitude de déformation;
ω	→	pulsation ($2\pi f$) (rad/s);
ϕ	→	angle de phase ($\phi = \omega * t_{lag}$);
i	→	partie imaginaire d'un nombre complexe ($i^2 = -1$);
t_{lag}	→	temps de déphasage entre σ_0 et ε_0 .

La notation vectorielle ou complexe peut aussi être utilisée pour exprimer le module complexe, soit : $E^* = E_1 + i E_2$. La partie E_1 représente la partie réelle du module complexe, soit le module réversible dû au comportement élastique du matériau. Il s'agit de la quantité d'énergie élastique emmagasinée en cours d'essai. La partie E_2 représente la partie imaginaire du module, soit le module irréversible associé au comportement visqueux du matériau. Il s'agit de la quantité d'énergie dissipée lors de la sollicitation du matériau.

1.5.1.1 Méthodes d'essai pour la mesure du module complexe

Il existe plusieurs méthodes qui permettent de déterminer le module complexe d'un EB. Ces méthodes peuvent être classées en deux catégories : 1) les essais homogènes, 2) les essais non homogènes. Les essais homogènes permettent d'obtenir la loi de comportement du matériau sans devoir émettre d'hypothèse (Di Benedetto et Corté, 2005). Dans le cas d'un essai homogène, l'état de contrainte et de déformation est le même en tout point de l'éprouvette, ce qui n'est pas le cas pour les essais non homogènes. Les essais non homogènes sont effectués sur des modèles réduits et permettent d'obtenir une propriété d'usage donnée.

Dans le cadre de ce projet, l'essai de traction-compression a été utilisé pour mesurer le module complexe des EB. Cet essai a été choisi puisqu'il permet un chargement homogène, soit un chargement uniformément distribué dans l'échantillon testé. L'essai permet ainsi le calcul de l'état de contrainte-déformation dans l'axe de sollicitation de façon simple. De cette façon, il n'y a pas de recours à l'utilisation de loi de similitudes puisque le calcul des propriétés rhéologiques de l'EB se fait directement à partir des résultats obtenus (Carter et Perraton, 2002). De plus, ce type d'essai permet la réalisation des essais de fatigue sans modification de la configuration.

1.5.1.2 Représentation graphique des résultats de module complexe

Étant donné que les résultats varient en fonction de la température et de la fréquence de sollicitation, les différentes composantes du module complexe ($|E^*|$, φ , E_1 , E_2) peuvent être représentés graphiquement de plusieurs façons.

Courbes isothermes

Les courbes isothermes (Figure 1.10) illustrent la variation de la norme du module complexe ($|E^*|$) en fonction de la fréquence et ce, pour chacune des températures d'essais. En plus de permettre d'extraire les valeurs de module pour des calculs de dimensionnement, cette représentation des résultats permet d'estimer la susceptibilité cinétique de l'EB en fonction des pentes des isothermes, soit la variation de module en fonction de la vitesse de sollicitation pour une température donnée (Di Benedetto et Corté, 2005).

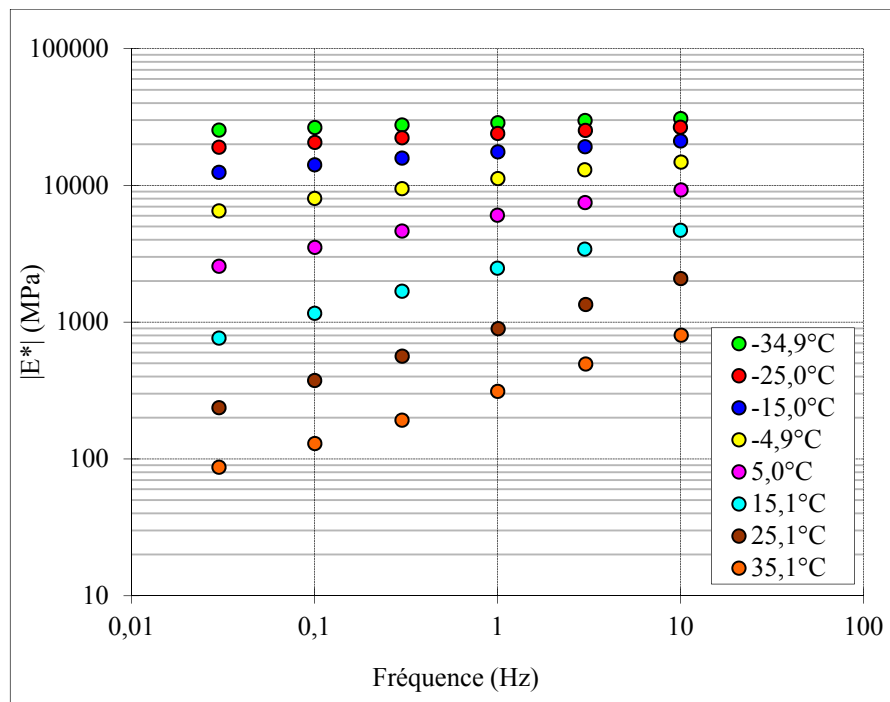


Figure 1.10 Courbes isotherme d'un essai de module complexe (Éprouvette ESG-14R-P2B3X; PG 64-34P)

Courbes dans le plan Cole-Cole

La représentation graphique dans le plan Cole-Cole (Figure 1.11) sert à illustrer la partie réelle E_1 en abscisse et la partie imaginaire E_2 en ordonnée. Avec les résultats expérimentaux, il est possible d'obtenir les paramètres du modèle rhéologique 2S2P1D (décrit à la section 1.5.1.3) et de modéliser le comportement en petites déformations d'un EB. De plus, lorsque le matériau testé obéit au principe d'équivalence temps-température (PETT), les points expérimentaux suivent une courbe unique dans le plan Cole-Cole (Di Benedetto et Corté, 2005).

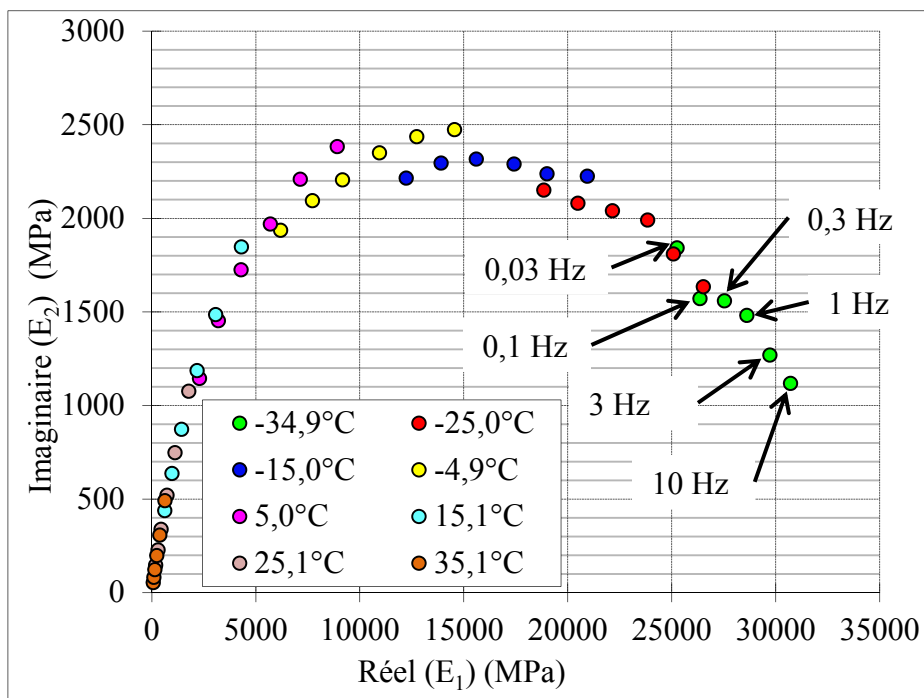


Figure 1.11 Plan Cole-Cole d'un essai de module complexe (Éprouvette ESG-14R-P2B3X; PG 64-34P)

Courbe dans l'espace de Black

La représentation graphique des résultats de module complexe dans l'espace de Black (Figure 1.12) permet de représenter l'angle de phase ϕ en abscisse et la norme du module complexe $|E^*|$ en ordonnée. La représentation de l'espace de Black est utilisée pour visualiser la zone où les valeurs de modules sont faibles ainsi que la diminution de l'angle de phase pour les hautes températures (Di Benedetto et Corté, 2005). Lorsque le matériau testé obéit

au PETT, les points expérimentaux suivent une courbe unique. Par contre, pour certains EB contenant des bitumes particuliers (à forte teneur en paraffines ou à forte teneur en polymères) les courbes ne sont plus uniques dans l'espace de Black, tel qu'illustré à la Figure 1.12 (Di Benedetto et Corté, 2005). Lorsqu'on observe uniquement dans le plan Cole-Cole, on dit ainsi que le matériau obéit partiellement au PETT.

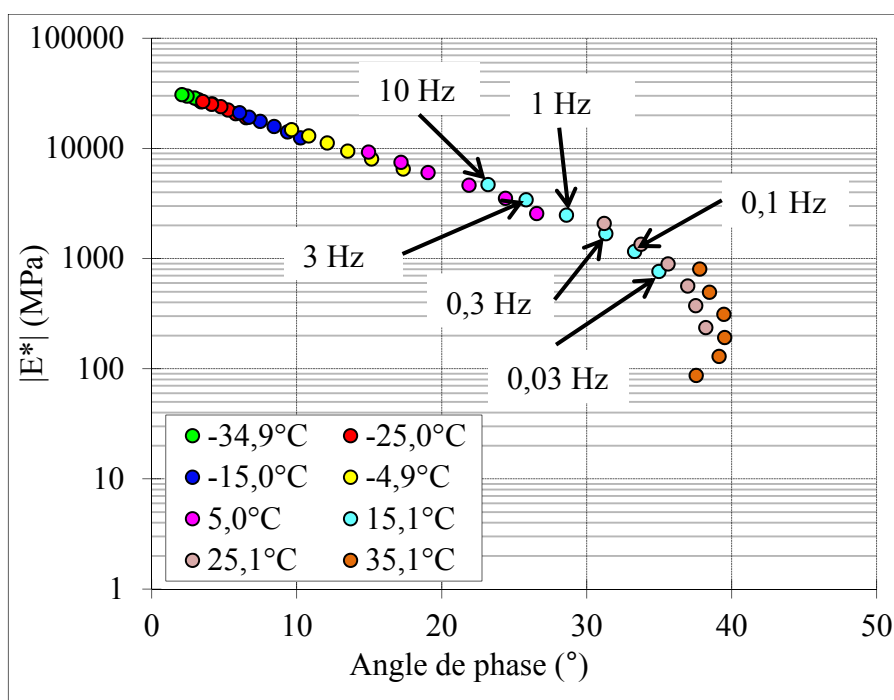


Figure 1.12 Courbe dans l'espace de Black d'un essai de module complexe
(Éprouvette ESG-14R-P2B3X; PG 64-34P)

1.5.1.3 Modélisation du module complexe

De nombreux chercheurs ont travaillé à développer des modèles de prédiction des valeurs de module complexe (Olard et Di Benedetto, 2003). Parmi ces modèles, notons le modèle 2S2P1D (2S : *two spring*; 2P : *two parabolic element*, 1D : *one dashpot*). 2S2P1D permet de bien prédire l'évolution du module complexe d'un EB, mais également celui des mastics et des bitumes (Olard et Di Benedetto, 2003). La Figure 1.13 schématise l'arrangement des différents éléments rhéologiques simples utilisés dans le modèle 2S2P1D.

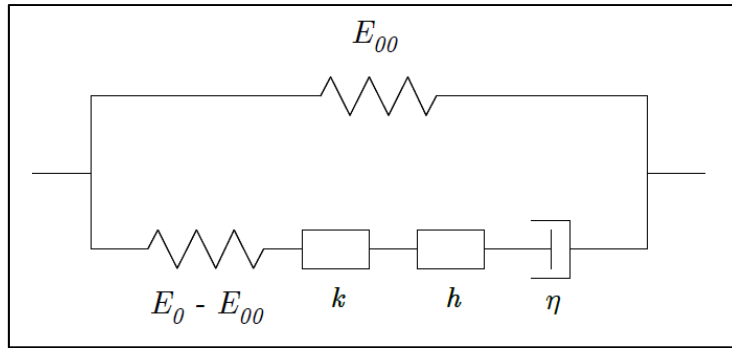


Figure 1.13 Modèle rhéologique 2S2P1D
Tirée de Olard et Di Benedetto (2003)

$$E^*(i\omega\tau) = E_{00} + \frac{E_0 - E_{00}}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}} \quad (1.2)$$

Où selon Olard et Di Benedetto (2003), les paramètres sont les suivants :

i	→	nombre complexe défini $i^2 = -1$;
ω	→	2π * fréquence, pulsation;
k, h	→	exposants tels que $0 < k < h < 1$;
E_0	→	la valeur du module lorsque $\omega \rightarrow \infty$ (module vitreux);
E_{00}	→	la valeur du module lorsque $\omega \rightarrow 0$ (module statique);
δ	→	constante sans dimension;
β	→	constante sans dimension;
τ_0	→	temps de relaxation, caractéristique dont la valeur dépend uniquement de la température de calcul.

1.5.1.4 Principe d'équivalence temps-température (PETT)

Le module complexe d'un EB s'exprime toujours en fonction de la température et de la fréquence d'essai, sans quoi la valeur de module n'a aucune signification (Carter et Perraton, 2002). Pour un EB, on remarque à l'examen des courbes isothermes (Figure 1.10) qu'une même valeur de module peut être obtenue pour un autre couple de température-fréquence (Baaj, 2002). De plus, lorsque les points expérimentaux permettent de définir une courbe

unique dans le plan Cole-Cole (Figure 1.11) et l'espace de Black (Figure 1.12), on dit que le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température (PETT) (Di Benedetto et Corté, 2005). Ce principe d'équivalence permet d'énoncer qu'une augmentation de la fréquence de sollicitation a un effet équivalent à une baisse de la température (Carter et Perraton, 2002).

Lorsqu'un enrobé bitumineux respecte le principe le PETT, il est possible de construire une courbe unique ($\log |E^*|$, $\log Fr\text{-eq}$) pour une température de référence choisie et ainsi d'obtenir des valeurs de module pour des fréquences inaccessibles par l'expérimentation (Di Benedetto et Corté, 2005). Pour les matériaux qui obéissent au PETT, le module complexe peut être exprimé en fonction d'une seule variable soit : $E^*(\omega, T^\circ) = E^*(\omega \cdot f(T^\circ)) = E^*(\omega \cdot a_T, T_{ref}^\circ)$ où a_T est la fonction de translation qui peut être décrite avec la loi de WLF présenté à l'équation (1.3) (William, Landier et Ferry, 1955). La courbe maîtresse est obtenue en effectuant une translation parallèle à l'axe des fréquences de chaque isotherme par rapport à l'isotherme correspondant à la température de référence T_{ref} telle qu'illustrée à la Figure 1.14.

$$\log(a_t) = \frac{-C_1 (T_i - T_{ref})}{C_2 + (T_i - T_{ref})} \quad (1.3)$$

Où les paramètres sont les suivants :

C_1, C_2	→	constantes qui dépendent du matériau testé;
T_i	→	température donnée;
T_{ref}	→	température de référence.

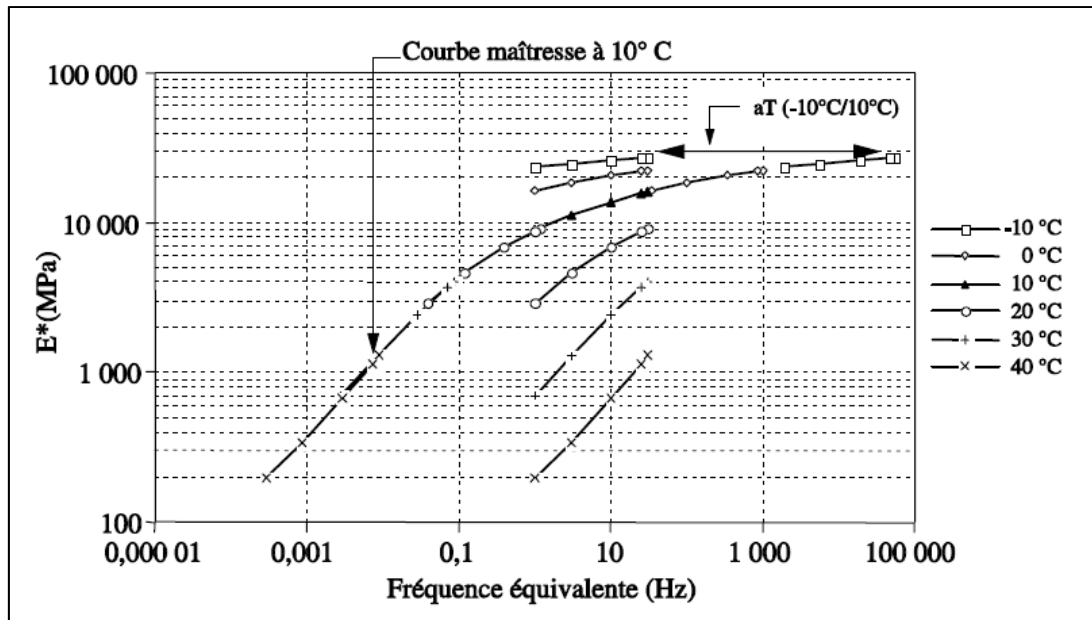


Figure 1.14 Courbe maîtresse d'un essai de module complexe à 10°C
Tirée de Di Benedetto et Corté (2005)

1.5.1.5 Paramètres influençant le module complexe

Il est possible de classer en deux catégories les paramètres qui ont un impact sur les résultats de module complexe : 1) paramètres liés aux conditions d'essai et, 2) paramètres propres à l'EB (Di Benedetto et Corté, 2005).

Paramètres liés aux conditions d'essai

Les paramètres qui ont le plus d'influence sur les résultats d'un essai de module complexe d'un EB sont la température et la fréquence de sollicitation. L'influence de la fréquence de sollicitation sur la norme du module complexe ($|E^*|$) est beaucoup plus importante à haute température qu'à basse température (Di Benedetto et Corté, 2005). L'angle de phase (ϕ) varie aussi de façon importante en fonction de ces deux paramètres. Selon Di Benedetto et Corté (2005), la valeur de ϕ augmente avec la température jusqu'à ce qu'elle atteigne un palier et diminue par la suite. Cela signifie qu'au-delà d'une certaine température, le bitume devient fluide et n'intervient pas dans la rigidité de l'EB.

Le bitume agit alors comme lubrifiant entre les granulats du squelette granulaire. Bien entendu, ce comportement varie en fonction du bitume utilisé. Le nombre de sollicitations est aussi un paramètre important dans un essai de module complexe. Bien que l'amplitude de sollicitation soit faible, la répétition d'un grand nombre de sollicitations entraîne une non-linéarité du comportement de l'EB testé ainsi qu'un échauffement de l'éprouvette (Di Benedetto et Corté, 2005). Il faut donc appliquer le plus faible nombre de sollicitations possibles lors de la réalisation d'un essai de module complexe.

Paramètres propres à l'EB

Trois principaux paramètres propres à l'EB influent sur les résultats de module complexe soit : 1) Liant, 2) Granulats et fines et, 3) Teneur en vides (Di Benedetto et Corté, 2005). Le type et la quantité de bitume ont un grand impact sur le module d'un EB. Une augmentation de la quantité de bitume conduit à une augmentation du module de l'EB jusqu'à une teneur en bitume optimale ou une augmentation de la quantité de bitume entraîne une diminution du module (Di Benedetto et Corté, 2005). Il y a donc une quantité optimale de bitume à utiliser pour un EB du point de vue de la rigidité de ce dernier. Le type de bitume utilisé est aussi un paramètre qui influe sur les résultats de module complexe.

Les granulats ont aussi un impact sur les résultats de module complexe. Puisqu'à haute température le bitume agit comme lubrifiant entre les granulats, les granulats ont surtout un impact sur la rigidité à haute température et à basse fréquence (Di Benedetto et Corté, 2005). De plus, la teneur en fines influe aussi sur les résultats de module complexe. Une teneur en fines élevée améliore de façon générale la rigidité d'un EB (Di Benedetto et Corté, 2005).

La teneur en vides est un paramètre important à prendre en considération lors des essais de module complexe. De façon générale, les éprouvettes testées doivent avoir une teneur en vides similaires. Lorsque la teneur en vides diminue, la rigidité de l'EB testé augmente et sa susceptibilité thermique diminue (Di Benedetto et Corté, 2005).

1.5.2 Déformation permanente dans les chaussées bitumineuses

L'accumulation de déformations permanentes, non réversibles, dans une chaussée est connue sous le nom d'orniérage. Deux principaux types d'ornières existent dans la chaussée, soit 1) les ornières à grand rayon et, 2) les ornières à faible rayon (Perraton, 2012). Les ornières à grand rayon sont surtout associées à une mauvaise conception ou bien une mauvaise construction de la structure de la chaussée.

Les ornières de faible rayon sont associées aux couches d'EB et sont regroupées sous trois catégories : 1) les ornières de consolidation, 2) les ornières de fluage et, 3) les ornières d'usure. Les deux premières catégories d'ornières sont des phénomènes qui se suivent chronologiquement, à moins que l'EB ait un taux de compaction élevée suite à la mise en place. Dans ce cas, des ornières de fluage apparaîtront sans qu'il y ait eu des ornières de consolidation (Lamothe, 2004). Les ornières d'usure sont le résultat du polissage, de l'arrachement ou du désenrobage des granulats (Lamothe, 2004).

Généralement, l'orniérage de consolidation d'un EB se produit en deux phases (Lamothe, 2004). Dans un premier temps, l'EB se densifie dû au passage des véhicules jusqu'à une valeur d'environ 4 % de vides (peut varier selon l'EB considéré). À cette étape, les granulats atteignent un arrangement optimal permettant de limiter les déformations permanentes. Par la suite, la consolidation de l'EB se poursuit jusqu'à une teneur en vides d'environ 2 % (Figure 1.15). Suite à ce post-compactage, l'EB se retrouve sur compacté et l'orniérage subséquent est lié à un réarrangement des particules du squelette granulaire attribuable au fluage du bitume. L'orniérage de fluage se déroule durant la majeure partie de la vie utile de l'EB.

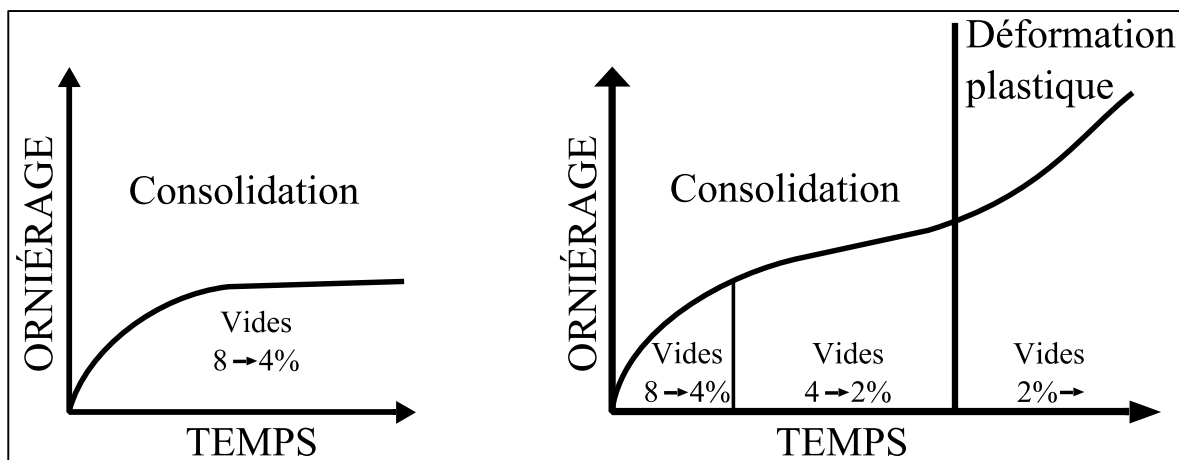


Figure 1.15 Illustration du mécanisme d'orniérage dans les enrobés bitumineux
Adaptée de F. Parker et Brown (1991)

Les ornières de consolidation et de fluage sont associées à un EB mal formulé. L'orniérage de consolidation est dû à une mauvaise compaction d'une couche d'EB. L'orniérage de fluage est associé aux EB instables et peut être causé par plusieurs facteurs : teneur en vides inappropriée; une teneur en bitume trop élevée; mauvais grade PG de bitume; trop grande quantité de granulat passant au tamis 80 μm ; angularité insuffisante des granulats; etc. (Perraton, 2012). Généralement, une forte angularité des granulats, une teneur en vides interstitiels optimale de 4 % (V_i), une teneur en vide intergranulaire faible (V_{AM}) ainsi qu'une faible proportion de granulats fins sont des facteurs qui permettent d'obtenir de bonnes résistances à l'orniérage (Sousa, Craus et Monismith, 1991).

1.5.3 Fissuration à basse température

Le phénomène de fissuration thermique d'un EB est dû au comportement du bitume qui lors d'une baisse de température cherche à se contracter. Puisque les granulats s'opposent à cette contraction, le risque de fissuration augmente. Selon Perraton et Olard (2013) :

« La variation volumétrique différentielle dans l'enrobé entre le granulat et le bitume engendre des concentrations de contraintes qui peuvent induire des microfissures dans le mastic lorsque cette tension atteint la résistance maximale en traction bitume ».

Dans une chaussée, étant donné que la contraction thermique de l'EB est empêchée, les variations de température engendrent des contraintes au sein du matériau (Perraton et Olard, 2013).

1.5.4 Phénomène de fatigue

Tout au long de sa vie utile, une chaussée est soumise au passage des véhicules. Les sollicitations induites par les véhicules créent des efforts de flexion et de compression dans les EB. Ces efforts ne provoquent pas la rupture immédiate de l'EB. C'est l'accumulation des dommages engendrés par ces efforts qui entraîne la rupture de l'EB. Le phénomène de fatigue est ainsi caractérisé par la répétition des cycles de flexion et de compression due au passage répétés des véhicules (Di Benedetto et Corté, 2005). Le but de l'essai est de quantifier la durée de vie d'un EB. Lors d'un essai de fatigue, la mesure de l'évolution de la raideur de l'EB présente une chute témoignant ainsi d'un endommagement du matériau. Comme illustré à la Figure 1.16, l'évolution de la raideur peut être décomposée selon trois phases suivant un essai de fatigue, soit :

Phase 1 : correspond à l'échauffement du matériau et une chute rapide du module complexe du matériau;

Phase 2 : correspond à une diminution progressive du module complexe, de type quasi linéaire, lié en grande partie à l'endommagement par fatigue du matériau;

Phase 3 : correspond à une décroissance prononcée de la valeur du module complexe, une augmentation rapide du développement des microfissures et à l'apparition d'une macro fissure menant à la rupture de l'éprouvette.

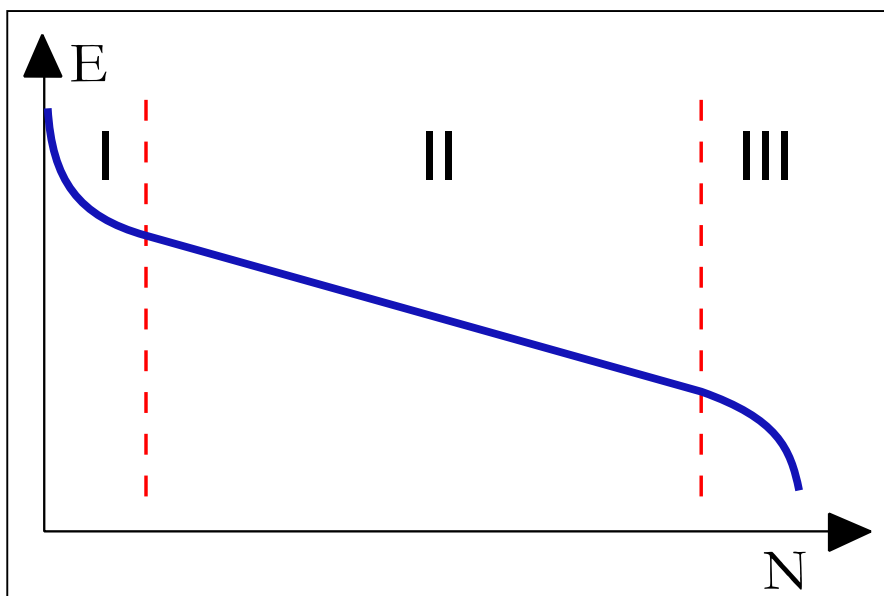


Figure 1.16 Évolution du module complexe lors d'un essai de fatigue
Tirée de Baaj (2002)

Selon Perraton et Olard (2013) : « L'endommagement par fatigue en cours des phases I et II se manifeste par un ensemble de microfissures qui se développent de façon relativement homogène dans l'ensemble du volume de l'éprouvette ». Lors de la phase III, la concentration de ces microfissures mène à l'apparition d'une macro fissure qui conduit à la rupture du matériau.

1.5.4.1 Type d'essai

L'essai de résistance à la fissuration par fatigue peut être réalisé suivant deux modes de sollicitation cyclique, soit : 1) essais en contrôle de force (contrainte constante pour un essai homogène) et, 2) essais en contrôle de déplacement (déformation constante pour un essai homogène). Dans le cas des essais conduits en contrôle de force, l'amplitude de déformation augmente en cours d'essai jusqu'à la rupture du matériau. Pour les essais menés en contrôle de déplacement, l'amplitude de la force diminue en cours d'essai jusqu'à la rupture du matériau.

1.5.4.2 Méthodes d'analyse d'un essai de fatigue

Plusieurs méthodes existent afin d'évaluer la résistance à la fatigue d'un EB (Baaj, 2002). Certaines de ces méthodes visent à déterminer la durée de vie de l'EB tandis que d'autres visent à déterminer l'état d'avancement de l'endommagement de l'EB (Touhara, 2012). Quelques méthodes sont présentées dans les paragraphes suivants.

Critère de rupture classique ($N_{f50\%}$)

Le critère général retenu pour définir la durée de vie en fatigue d'un matériau bitumineux correspond à une perte de 50 % de la valeur initiale de la norme du module complexe. Selon Di Benedetto et Corté (2005), ce critère de durée de vie est représentatif de la rupture complète du matériau dans le cas des essais conduits en contrôle de force. Par contre, dans le cas des essais menés en contrôle de déplacement, le critère de rupture classique est arbitraire par rapport à la rupture réelle du matériau.

Critère de rupture lié à la transition entre les phases II et III ($N_{fII/III}$)

Le critère de durée de vie qui est associée au nombre de cycles correspondant à la transition entre les phases II et III est annoté $N_{fII/III}$ et propose de cerner le moment où la densité de microfissures est critique (Touhara, 2012). Le point de transition entre les phases II et III représente le moment où l'apparition d'une macro fissure au sein de l'éprouvette se concrétise. Pour cerner la valeur de $N_{fII/III}$, il est possible de se référer à plusieurs paramètres dont, notamment : 1) évolution de l'écart entre les extensomètres ($N_{f\Delta ext}$), 2) évolution de l'angle de phase selon l'espace de Black ($N_{f\phi}$).

Écart entre les extensomètres ($N_{f\Delta ext}$)

Le nombre de cycles correspondant à la transition entre les phases II et III peut être obtenu en se fiant aux courbes d'évolutions relatives de déformations des extensomètres. Lorsqu'il y a un écart de plus de 25 % entre la déformation d'un extensomètre par rapport à la moyenne, on considère que le champ de contrainte n'est plus homogène (Baaj, 2002).

Évolution de l'angle de phase ($N_{\varphi_{max}}$)

Une autre façon d'obtenir le nombre de cycles correspondant au changement entre les phases II et III consiste à suivre l'évolution de l'angle de phase. Lors de la transition, l'angle de phase atteint une valeur maximale et diminue par la suite. Le nombre de cycles correspondant à la valeur maximale de l'angle de phase permet de déterminer la durée de vie du matériau (Touhara, 2012).

1.5.4.3 Représentation graphique

Les durées de vie établies des essais de fatigue sont présentées dans un graphique log-log dont l'axe des abscisses représente la durée de vie en nombre de cycles et l'axe des ordonnées représente l'amplitude de la sollicitation (Figure 1.17).

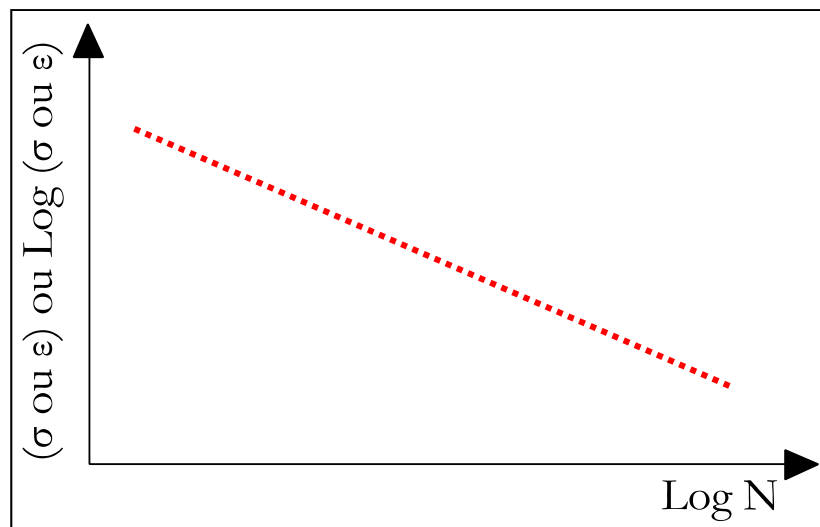


Figure 1.17 Courbe de Wöhler
Tirée de Baaj (2002)

La droite de fatigue, aussi nommé droite de Wöhler permet de décrire la durée de vie en fonction de l'amplitude de sollicitation imposée en traçant dans un domaine log-log la relation entre la durée de vie des éprouvettes ($\log N$) et l'amplitude de déformation ($\log \varepsilon_0$). Une relation linéaire est conventionnellement admise pour cette relation, désignée droite de fatigue, et représente la loi de fatigue du matériau. La durée de vie s'exprime de la façon suivante (Touhara, 2012) :

$$N_f = c_1 (\varepsilon_0)^{-c_2} \quad (1.4)$$

Où les paramètres sont les suivants :

- N_f → Nombre de cycles à la rupture;
- ε_0 → Amplitude de la déformation imposée (m/m) à une température donnée (θ_i) et une fréquence donnée (F_{r_i});
- c_1 → Coefficient correspondant à la durée de vie de l'EB pour une amplitude de déformation imposée de 1 m/m à une température donnée et une fréquence donnée;
- c_2 → Coefficient lié à la pente de la droite de fatigue de l'EB.

L'élaboration de cette droite de fatigue (loi de fatigue) nécessite la réalisation de plusieurs essais de fatigue qui permettent de décrire le comportement de l'EB et de définir les deux paramètres de la droite de fatigue, soit : 1) sa pente (c_2) et, 2) son ordonnée à l'origine (c_1) (Touhara, 2012).

1.5.4.4 Paramètres influençant la résistance à la fatigue

Plusieurs paramètres ont un impact sur les résultats d'un essai de résistance à la fissuration par fatigue. Ces paramètres se regroupent en deux catégories : 1) paramètres liés aux conditions d'essai, 2) paramètre propre au matériau.

Paramètres liés aux conditions d'essai

Pour les essais en contrôle de déplacement, une augmentation de la température se traduit généralement par une augmentation de la durée de vie (Di Benedetto et Corté, 2005). De plus, une augmentation de la fréquence de sollicitation contribue généralement à une diminution de la durée de vie. La géométrie des éprouvettes ainsi que le mode de sollicitation (contrôle de déplacement ou de force) ont aussi un impact la durée de vie de même que le temps de repos entre les sollicitations.

Paramètres propres au matériau

La teneur en liant est le facteur qui a le plus d'impact sur la durée de vie en fatigue d'un EB (Di Benedetto et Corté, 2005). Généralement, une teneur en liant élevée augmente la durée de vie de l'EB. Bien entendu, le type de liant utilisé est aussi un paramètre qui influence les résultats de fatigue. Par ailleurs, les EB confectionnés avec des bitumes polymères présentent des durées de vie plus élevées que celles des EB confectionnés avec des bitumes conventionnels (Baaj, 2002).

Selon Di Benedetto et Corté (2005), la forme des granulats ne semble pas avoir d'impact sur la durée de vie en fatigue d'un enrobé. Par contre, la résistance mécanique des granulats ainsi que leurs propriétés d'adhérence ont un impact déterminant sur la résistance à la fatigue (Di Benedetto et Corté, 2005).

La compacité des éprouvettes est aussi un paramètre qui a un impact majeur sur la durée de vie en fatigue de l'EB, et ce, selon le type d'EB testé. Pour les EB denses, une augmentation de la compacité diminue la durée de vie en fatigue tandis que pour les EB de type grave bitume, c'est l'inverse. Cela est valide pour les essais en mode de contrôle de déplacement (Di Benedetto et Corté, 2005).

1.6 Utilisation du verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux

Cette section vise à faire un bilan des projets réalisés dans le passé et qui portent spécifiquement sur l'incorporation de particules de verre post-consommation dans les EB. Dans un premier temps, un bref historique sera présenté. Ensuite, il sera question de la formulation des EB avec verre. Un sommaire par rapport au dosage en particules de verre ainsi qu'aux caractéristiques importantes des particules de verre utilisé dans les EB sera aussi présenté. Finalement, la dernière section traitera de l'impact du verre sur différentes performances et caractéristiques des EB.

1.6.1 Historique de l'utilisation du verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux

L'idée d'utiliser le verre de post-consommation dans les EB a pour but d'aider à désengorger les sites d'enfouissement. Les premiers essais réalisés sur les EB avec verre ont débuté vers les années 70 (Watson, 1988). Les premières expériences en laboratoire ont été réalisées avec des EB où les granulats conventionnels ont été remplacés à 100% par du verre (Malish, Day et Wixson, 1975). Les travaux de cette recherche ont mené à la première planche d'essai situé à Toledo en Ohio en octobre 1969. La publicité engendrée par ce projet a créé un vaste intérêt pour l'utilisation des EB avec verre. Au total, une vingtaine de planches d'essais ont été réalisées d'octobre 1969 à septembre 1971 dans divers endroits aux États-Unis et au Canada (Malish, Day et Wixson, 1975).

Selon un rapport du *Department of Transportation* de l'état du Connecticut publié en 1989, des EB avec verre ont été mis en place avec succès sur un total d'au moins 45 sites différents entre 1969 et 1988 (Dembickl, 1992). Cela s'est fait principalement dans des endroits avec faible volume de circulation et faible vitesse de circulation, situé aux États-Unis et au Canada. Malgré le fait que les résultats obtenus aient été satisfaisants pour certaines applications, l'idée d'utiliser du verre dans les EB a été abandonnée dû au coût d'acquisition élevé du verre (Watson, 1988). L'idée a refait surface vers la fin des années 80 puisque les coûts de disposition du verre dans les sites d'enfouissement étaient très élevés. L'utilisation

de verre dans les EB devenait donc une solution possiblement rentable. À cette époque, un EB avec verre coûtait plus cher qu'un EB conventionnel (Dembickl, 1992). Les EB avec verre ne représentaient pas une solution économique aux EB conventionnels, mais bien une réponse au problème des coûts élevés de disposition. La rentabilité économique de l'utilisation du verre dépend beaucoup des coûts en approvisionnement du verre qui sont influencés par les coûts de transports et de concassage (Hughes, 1990).

1.6.2 Formulation des enrobés bitumineux avec verre post-consommation

Les principales études sur l'ajout de verre dans les EB ont été réalisées à partir de la méthode de formulation Marshall. Au Québec, la méthode Marshall est encore permise dans certains cas comme lors de la formulation d'EB à froid. Par contre, en ce qui concerne les EB à chaud, c'est la méthode LC qui est exigée.

Selon *The Connecticut Report*, les principaux problèmes reliés à l'utilisation du verre dans les EB sont les suivants (Kandhal, 1992) :

- manque d'adhésion entre le bitume et le verre;
- perte d'adhérence entre la surface de roulement et les pneus des véhicules;
- bris des particules de verre grossières;
- augmentation du risque d'arrachement;
- augmentation de la sensibilité du mélange à l'eau.

1.6.3 Dosage et caractéristiques physiques des particules de verre post-consommation utilisés dans les enrobés bitumineux

Selon la *Federal Highway Administration*, un dosage maximal de 15% de verre (par rapport à la masse totale de granulats) pour une couche de surface permettrait d'obtenir un EB dont les performances répondraient aux exigences (Federal Highway Administration, à jour au 23 avril 2012).

Par contre, en ce qui concerne les couches de base, il serait possible d'utiliser un dosage en verre pouvant aller jusqu'à 25 % puisque les phénomènes d'arrachement sont moins présents dans les couches de base (Wu, Yang et Xue, 2004). De plus, les EB en couches de base sont moins exposés aux agressions dues à l'eau. Les expériences réalisées dans le passé ont montré de bonnes performances pour les EB avec verre utilisé en couche de base et en couche de surface dans les zones à basses vitesses (Day et Schaffer, 1989).

Dans tous les cas, la granulométrie du verre utilisé est importante. Selon une étude réalisée par le *Virginia Department of Transportation*, les pourcentages passants au tamis 9,5mm et 0,075mm devraient être respectivement de 100% et de 6% maximum (Hughes, 1990). Wu, Yang et Xue (2004) ont conclu qu'un dosage de 10 % en verre dont la GNM est de 4,75 mm permet d'utiliser le verre dans les EB et d'obtenir des performances satisfaisantes. De plus, une recherche menée par la Federal Highway Administration (à jour au 23 avril 2012) a montré que les particules de verre de plus de 4,75mm étaient moins résistante aux efforts que les granulats conventionnels. Le fait d'augmenter le diamètre des particules de verre et par le fait même, d'en diminuer la surface spécifique ne favorise pas une bonne adhérence entre le verre et le bitume (Wu, Yang et Xue, 2004).

Par ailleurs, la forme des particules de verre utilisé est un facteur important au niveau du comportement de l'EB (Wu, Yang et Xue, 2004). Il est connu que les EB contenant des particules arrondies sont plus sujets à l'orniérage que ceux contenant des particules anguleuses (Di Benedetto et Corté, 2004). Évidemment, la méthode de concassage du verre joue un rôle important au niveau de la forme et la texture des granulats obtenus (Federal Highway Administration, à jour au 23 avril 2012). Un concassage grossier fait en sorte que les morceaux de verre sont de formes plates et allongées. Un concassage fin permet d'obtenir des particules fines avec une quantité moindre de formes plates et allongées.

Contrairement aux granulats conventionnels, le verre présente une surface lisse et absente d'aspérité (Day et Schaffer, 1989). Selon Wu, Yang et Xue (2004), la surface des particules de verre est lisse et ne favorise pas l'adhésion par ancrage mécanique entre le bitume et les

particules de verre. Compte tenu de la texture superficielle des particules de verre, il y a donc moins de chance que le bitume adhère à ces particules comparativement aux particules des granulats conventionnels où les aspérités et la texture superficielle favorisent d'adhésion par encrage mécanique. Par ailleurs, le faible taux d'absorption des particules de verre (près de 0 %) est non favorable à l'adhésion entre le bitume et les particules de verre (Wu, Yang et Xue, 2004). Les particules fines de verre ont une forme plus anguleuse que les particules grossières de verre. Il semble, à priori, que les particules fines de verre puissent présenter une meilleure adhésion avec le bitume (Wu, Yang et Xue, 2004).

1.6.4 Impact du verre sur les performances et caractéristiques des enrobés bitumineux

Le défi de concevoir un EB avec particules de verre est de trouver un bon équilibre au niveau des performances de l'enrobé tout en maximisant la quantité de verre utilisé pour un bon rapport qualité-prix. La section suivante présente les résultats de plusieurs études ayant porté sur l'incorporation de particules de verre de post-consommation dans les EB.

1.6.4.1 Caractéristiques thermiques

Des essais menés au Colorado School of Mines ont montré que les EB avec verre mettaient plus de temps à refroidir que les EB conventionnels (Federal Highway Administration, à jour au 23 avril 2012). Cela est dû au faible coefficient de conductivité thermique du verre en comparaison avec les granulats conventionnels.

Il apparaît que l'utilisation de particules de verre dans les EB peut être bénéfique au niveau de la rétention de la chaleur puisque les particules de verre refroidissent plus lentement que les granulats conventionnels, permettant ainsi à l'EB de garder une température appropriée par temps froid (Hughes, 1990). Par contre, cette rétention de chaleur peut engendrer une instabilité de l'EB par temps chaud et entraîner des problèmes de compaction (Hughes, 1990). Il convient donc d'ajuster le patron de compaction en conséquence.

1.6.4.2 Stabilité Marshall

Lorsque l'on substitue 100 % des granulats retenus sur un seul tamis par des particules de verre, la stabilité Marshall d'un EB diminue (Li et coll., 2011). Cette diminution de la stabilité de l'EB est d'autant plus importante lorsque la dimension des particules de verre utilisé est faible. Or, une autre recherche à montrer qu'il était possible d'obtenir un gain de stabilité Marshall en ciblant un dosage optimal en particules de verre et en utilisant une dope d'adhésivité comme la chaux hydratée et en utilisant un dosage de 15 % en verre (Arabani, 2011).

1.6.4.3 Résistance aux déformations permanentes

Selon Li et coll. (2011), lorsque l'on substitue 100 % des granulats retenus sur un seul tamis par des particules de verre, la résistance aux déformations permanentes de l'EB diminue d'environ 10 %. Airey, Collop et Thom (2004) ont montré que l'ajout de particules de verre diminue la résistance aux déformations permanentes des EB. Selon Airey, Collop et Thom (2004), le facteur responsable de la diminution de la résistance à la déformation permanente est la surface lisse du verre qui fait en sorte que les forces de friction entre les granulats et les particules de verre diminuent. De plus, l'ajout d'une dope d'adhésivité n'améliore pas la résistance à la déformation permanente.

Dans le cadre d'une autre recherche, des essais de résistance à l'orniérage immergé dans l'eau ont été réalisés avec l'aide de l'appareil Hamburg à une température de 45°C. Cet essai permet de mesurer l'effet combiné de la résistance à l'orniérage ainsi que la sensibilité à l'eau d'un EB (Wu, Yang et Xue, 2004). L'échantillon est inséré dans un bain d'eau chaude (45°C dans ce cas-ci) et soumis au passage répété d'une charge roulante. Les résultats de cette recherche sont présentés au Tableau 1.6 où l'on retrouve la profondeur de l'ornière exprimée en millimètre ainsi que la perte de masse en gramme. Les résultats montrent que la profondeur de l'ornière soit le potentiel de déformation permanente ainsi que la perte de masse augmente avec l'augmentation du dosage en verre.

Tableau 1.6 Résultats des essais de résistance à l'orniérage
Adapté de Wu, Yang et Xue (2004)

Dosage en verre par rapport à la masse de granulat(%)	Profondeur de l'ornière (mm)	Perte de masse (g)	Remarques
0	9,80	15,6	*la profondeur maximale de l'ornière est fixée à 15 mm ** rupture de l'échantillon
5	10,6	23,4	
10	13,6	49,5	
15	15,0*	88,7	
20	13,7**	230,3	

1.6.4.4 Rigidité

Arabani (2011) a montré que l'ajout de particules de verre en combinaison avec une dope d'adhésivité était bénéfique vis-à-vis la rigidité de l'EB. L'évaluation du module de rigidité des EB s'est fait avec l'aide d'un *Nottingham Asphalt Testing System* en évaluant le paramètre *Indirect tensile strength method (ITSM)*. L'augmentation de la rigidité serait due à la forme anguleuse des particules de verre qui a pour effet d'augmenter les forces de friction entre les particules. Par contre, il y a un dosage optimal en particules de verre puisqu'au-delà d'un certain dosage, le module de rigidité de l'EB diminue.

Airey, Collop et Thom (2004) ont aussi montré que l'ajout de particules de verre augmente la rigidité d'un EB. Les valeurs de module de rigidité ont été déterminées au moyen de l'essai *ISTM* sur un EB avec 50 % de particules de verre ainsi qu'un EB de référence. De plus, les valeurs de rigidité des deux EB ont aussi été évaluées suite à une cure dans une étuve chauffée à 85°C durant une période de 120 heures.

Ce conditionnement vise à évaluer la susceptibilité au vieillissement des EB en étudiant le rapport entre la valeur de module de rigidité avant le conditionnement et après le conditionnement. Pour les deux EB testés, on remarque une augmentation du module de rigidité après conditionnement. Par contre, cette augmentation de rigidité est plus faible pour l'EB avec verre ce qui veut dire que l'ajout de verre diminue la sensibilité au vieillissement de l'EB. Selon Airey, Collop et Thom (2004), cela est probablement dû au faible taux des particules de verre minimisant ainsi la migration des composés plus volatils du bitume dans les pores perméables des particules.

1.6.4.5 Teneur en vides

L'ajout de verre a tendance à diminuer l'indice des vides de l'EB (Hughes, 1990). Cette diminution de teneur en vides a pour effet de diminuer les vides intergranulaires (VAM) et d'augmenter les vides comblés par le bitume (VCB). Pour cette raison, il est important lors de l'utilisation de particules de verre dans les EB de tenir compte de la variation de l'indice des vides afin de s'assurer de maintenir un VAM suffisant pour ne pas trop augmenter les VCB (Hughes, 1990).

1.6.4.6 Sensibilité au dommage dû à l'eau

Une recherche a montré que lorsque l'on substitue 100 % des granulats retenus sur un seul tamis par des particules de verre, la sensibilité de l'EB au dommage à l'eau diminue (Li et coll., 2011). La taille des particules de verre semble être un paramètre important, car plus les particules de verre sont fines, plus la diminution de la sensibilité à l'eau est importante.

Or, de nombreuses recherches ont montré que l'utilisation de particules de verre augmente la sensibilité de l'EB au dommage à l'eau (Hughes, 1990) (G. W. Maupin, 1998) (Wu, Yang et Xue, 2004). Afin de contrer cet effet négatif, des dopes d'adhésivité sont souvent ajoutées aux EB afin de réduire leur sensibilité à l'eau.

Il s'agit généralement de chaux hydratée ou bien d'agent de type liquide. En plus de diminuer la sensibilité au dommage à l'eau, la chaux hydratée permet d'augmenter le module de rigidité de l'EB (Arabani, Mirabdolazimi et Ferdowsi, 2012).

Lors de l'utilisation du verre dans les EB en couche de base, il n'est pas nécessaire d'utiliser des dopes d'adhésivité étant donné que ces EB sont mieux protégés contre l'agression de l'eau comparativement aux EB de surface (Day et Schaffer, 1989). Par contre, l'utilisation d'une dope d'adhésivité est vivement conseillée lorsque des particules de verre sont incorporées dans des EB de surface (Day et Schaffer, 1989).

1.6.4.7 Résistance à la fatigue

Des résultats d'essais de fatigue menés sur des enrobés contenant des particules suivant différents dosages ont montré une augmentation de la résistance à la fissuration de fatigue (Arabani, Mirabdolazimi et Ferdowsi, 2012). Dans le cadre de cette étude, plusieurs éprouvettes de 100 mm de diamètre et de 40 mm d'épaisseur ont été soumises à l'essai de fatigue en traction indirecte (*Indirect tensile fatigue test-IFFT*) suivant une fréquence de chargement de 1 Hz. À noter que de la chaux hydratée a été utilisée comme dope d'adhésivité. Les résultats indiquent une meilleure résistance à la fatigue pour tous les EB testés avec différents dosages de verre (5, 10, 15, 20 %) par rapport à l'EB de référence. Le dosage de 10 % en particules de verre s'est avéré le plus performant en fatigue. Par contre, au-delà de ce dosage, la résistance à la fatigue diminue tout en restant supérieure à celle de l'EB de référence. Selon Arabani, Mirabdolazimi et Ferdowsi (2012) on observe une amélioration de la résistance à la fatigue due à la forte angularité des particules de verre qui augmente les frictions internes.

Airey, Collop et Thom (2004) ont par ailleurs montré que l'ajout de particules de verre n'a pas d'impact sur la performance en fatigue. Selon ces auteurs, en évaluant la performance à la fatigue avec des paramètres constants tels que : type de bitume, volume de bitume effectif, indice des vides, granularité, la performance à la fatigue est indépendante de la source et du type de granulats.

CHAPITRE 2

PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Cette section vise à décrire les différentes étapes du programme expérimental élaborées en vue d'étudier la possibilité d'incorporer des particules de verre de post-consommation dans un enrobé bitumineux tout en conservant des performances équivalents celles d'un enrobé conventionnel et ce, par rapport aux exigences de la méthode de formulation LC. Le premier objectif du projet a été d'étudier l'effet du dosage en verre au niveau des caractéristiques volumétriques, de l'aptitude au compactage et de la résistance à l'orniérage. Par la suite, le deuxième objectif fut de sélectionner un dosage optimal selon les résultats obtenus. Enfin, le dernier objectif a été d'évaluer et de comparer les performances de l'EB avec dosage optimal en verre avec un EB conventionnel.

Puisque la réutilisation de matériaux recyclés dans les matériaux de chaussées est bénéfique d'un point de vue environnemental et souvent comportemental, l'idée d'incorporer des particules de verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux est donc reprise au LCMB. Dans le cadre de ce projet, les recherches ont été concentrées sur un seul type d'enrobé bitumineux, soit l'enrobé ESG14. Cet enrobé a été choisi, car il peut être utilisé autant en couche unique, c'est-à-dire comme couche de surface, qu'en couche de base.

La revue de littérature a montré qu'il est possible d'utiliser jusqu'à 25 % de verre dans des enrobés utilisés en couche de base. La granulométrie des particules de verre est un paramètre important à prendre en considération. La littérature rapporte que pour obtenir des performances équivalentes à un enrobé conventionnel, le diamètre maximal des particules de verre à utiliser dans un EB est de 4,75 mm. De plus, la faible valeur d'absorption des particules de verre comparativement à celle des granulats conventionnels fait en sorte que la demande en bitume d'ajout peut être réduite lorsque des particules de verre sont incorporées aux enrobés bitumineux. Par ailleurs, il a été relevé que les enrobés bitumineux avec verre

sont plus sensibles à l'orniérage ainsi qu'au dommage dû à l'eau. Suivant ces informations, un programme de recherche a été élaboré et est présenté dans ce chapitre.

2.1 Programme de recherche

Le programme expérimental de ce projet se présente en trois phases: 1) étude de l'effet du dosage en verre, 2) sélection d'un dosage optimal de particules de verre, 3) évaluation des performances, des caractéristiques physiques et de la durabilité d'un enrobé bitumineux avec particules de verre et comparaison avec un enrobé de référence. Afin de faciliter la compréhension du cheminement de ce projet, les différentes phases du programme expérimental ainsi que les essais réalisés sont présentés à la Figure 2.1.

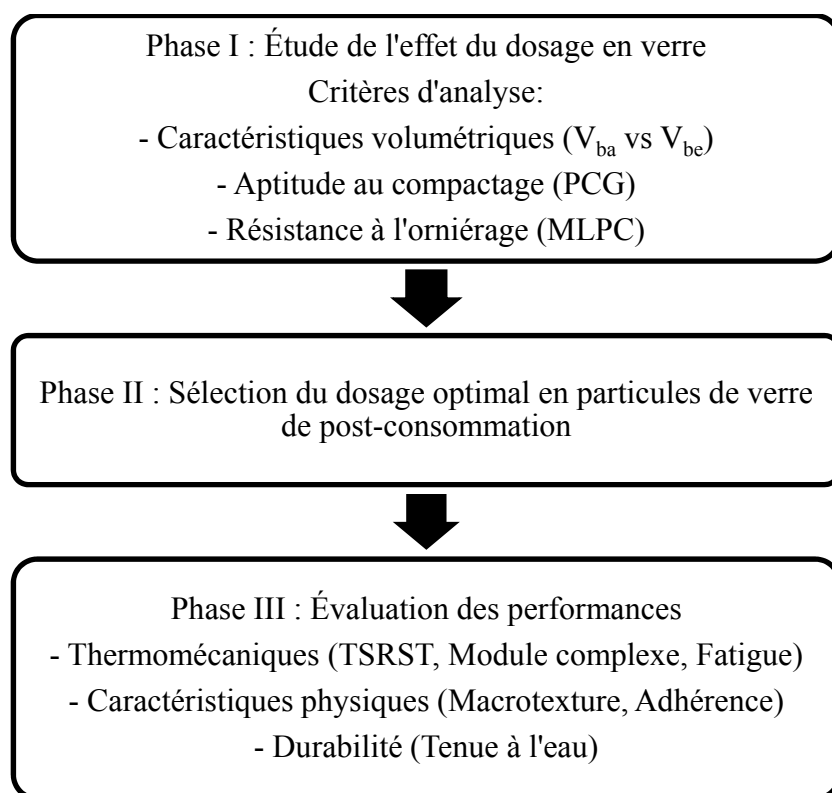


Figure 2.1 Organigramme du programme expérimental

2.1.1 Phase I : Étude de l'effet du dosage en verre

Dans un premier temps, l'étude de l'effet du dosage en particules de verre est orchestrée suivant la méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées du ministère des Transports du Québec en considérant la presse à cisaillement giratoire (PCG) et l'essai de résistance à l'orniérage. Basé sur la revue de la littérature, deux granulométries de particules de verre ont été ciblées, soit les fractions 0-0,315mm et 0,630-2,5mm, et incorporés suivant cinq dosages (5, 10, 15, 20 et 25 % massique). Le détail relatif au processus de sélection des granulométries et des dosages est présenté à la section 3.2.2. De plus, pour différencier les EB, ceux-ci ont été identifiés de la façon suivante : EB de référence (ESG-14R), EB avec verre (ESG-14V-5) où le dernier chiffre représente le dosage en verre. La nomenclature utilisée est décrite plus en détail à la Figure 3.4

La première étape de la phase I vise à évaluer l'impact de l'ajout de particules de verre de post-consommation quant aux caractéristiques volumétriques (V_{ba} vs V_{be}) des différents EB. Ces caractéristiques sont évaluées au moyen de l'essai de densité maximale. Dans le cadre de ce projet, la teneur en bitume d'ajout des EB étudiés a été ajustée de manière à obtenir un volume de bitume effectif constant (V_{be}) de $11,4 \% \pm 0,1 \%$. Pour chacune des formulations d'enrobé ainsi établies, l'aptitude au compactage est alors évaluée au moyen de la presse à cisaillement giratoire. Finalement, les EB avec verre conforme aux exigences relatives à l'aptitude au compactage selon la norme LC 4202 : *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des chaussées* et spécifique à l'enrobé ESG14 sont ensuite soumis à l'essai de résistance à l'orniérage.

2.1.2 Phase II : Sélection du dosage optimal en particules de verre post-consommation

À partir des résultats obtenus suite à la phase I du projet, l'ensemble des résultats est analysé en vue de sélectionner un dosage optimal en particules de verre. Pour ce faire, les critères de sélection définis suivant les exigences de la norme 4202 relativement à l'enrobé ESG14 et

portant sur 3 critères: 1) V_{be} , 2) indice des vides à 10, 100 et 200 girations, 3) profondeur des ornières après 30,000 cycles.

2.1.3 Phase III : Évaluation et comparaison des performances, des caractéristiques physiques et de la durabilité

Une fois le dosage optimal en particules de verre sélectionné, les performances thermomécaniques de l'EB avec particules de verre et d'un enrobé de référence sont évaluées à partir d'éprouvettes cylindriques carottées dans des plaques d'EB. Pour ces enrobés, la résistance au retrait thermique empêché, le module complexe, la résistance à la fissuration par fatigue et les caractéristiques physiques de macro texture et d'adhérence de même que la tenue à l'eau ont été déterminés.

CHAPITRE 3

MATÉRIAUX UTILISÉS, FORMULATION DES ENROBÉS, PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ET MÉTHODES D'ESSAIS

Ce chapitre vise à fournir toutes les informations relatives à la réalisation du programme expérimental. Les matériaux utilisés et les différents enrobés bitumineux testés sont décrits en détail. Une description du mode de préparation des éprouvettes est également présentée. Finalement, il est aussi question des différentes méthodes d'essais employés dans le cadre de cette recherche.

3.1 Description des matériaux utilisés

Dans cette section, les caractéristiques des différents matériaux utilisés pour la confection des EB sont présentées.

3.1.1 Caractéristiques des granulats utilisés

Les granulats utilisés proviennent d'une carrière située dans la municipalité de St-Philippe. Les principales caractéristiques des granulats utilisés sont présentées dans le Tableau 3.1 tandis que les courbes granulométriques sont présentées à l'annexe IV. À noter que les informations des granulats ont été fournies par le fabricant.

Tableau 3.1 Caractéristiques des granulats utilisés

Classe granulaire		10-14	5-10	0-5 non lavé	0-5 lavé
Nature minéralogique		Calcaire	Calcaire	Calcaire	Calcaire
Densité brute (d_{gb})		2,725	2,721	2,718	2,711
Absorption en eau (%)		0,53	0,58	0,65	0,71
Granulométrie	Tamis (mm)	% passant			
	20	100			
	14	87	100		
	10	13	91	100	100
	5	2,0	9,0	97	95
	2,5	2,0	2,0	66	58
	1,25	2,0	2,0	44	33
	0,630	2,0	2,0	31	19
	0,315	2,0	2,0	25	11
	0,160	2,0	2,0	20	8,0
	0,080	1,2	1,3	15	5,0
Caractéristiques intrinsèques	Micro-Deval (%)	17,0	9,0	14,5	8,7
	Los Angeles (%)	24	23	S.O.	S.O.
	MD + LA (%)	41	32	S.O.	S.O.
	Indice de friabilité (%)	S.O.	S.O.	29	35
Caractéristiques de fabrication	% fragmentation	100	100	S.O.	S.O.
	% particules plates	10,7	15,2	S.O.	S.O.
	% particules allongées	20,5	2,6	S.O.	S.O.
Catégorie de granulat selon la norme BNQ 2560-114		2a	1a	1	1

3.1.1 Caractéristiques des particules de verre utilisées

Le verre utilisé est un verre de post-consommation concassé et fourni par la compagnie *Tricentris*. Les caractéristiques des deux dimensions de particules de verre utilisées sont présentées dans le Tableau 3.2 tandis que les courbes granulométriques sont présentées à l'annexe IV (Figure-A IV-2). À noter que la Figure-A IV-3 de l'annexe IV présente les courbes granulométriques du passant au tamis 0,080 mm pour le granulat 0-5 ainsi que le verre 0-0,315.

Tableau 3.2 Caractéristiques des particules de verres utilisés

Classe granulaire		0-0,315	0,630-2,5
Nature minéralogique		Silice	Silice
Densité brute (d_{gb})		2,532	2,496
Absorption en eau (%)		0,07	0,20
Granulométrie	Tamis (mm)	% passant	
	2,5		100
	1,25		34
	0,630		0,2
	0,315	100	0,2
	0,160	92	0,1
	0,080	66	0,1

3.1.2 Description du bitume utilisé

Dans le cadre de cette recherche, un seul type de bitume a été utilisé, soit le bitume PG 64-34P et dont l'attestation de conformité est présentée dans l'ANNEXE III. Les principales caractéristiques du bitume sont présentées dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3 Caractéristiques du bitume utilisé (selon le fournisseur)

Fournisseur		Les Industries McAsphalt Ltée.
Lieu de fabrication		Usine de Valleyfield
Classe de bitume		PG 64-34P
Méthode d'essai	Essai de caractérisation	Valeur obtenue
ASTM D70	Masse volumique à 25 °C (g/cm ³)	1,012
LC 25-003	Point de ramollissement moyen (°C)	57,1
ASTM D5	Pénétration (1/10 mm)	131
LC 25-005	Recouvrance d'élasticité (%) à 10 °C	91,3
AASHTO T316	Viscosité Brookfield (mPa·s) à 135 °C	780
	Viscosité Brookfield (mPa·s) à 165 °C	260
AASHTO T315	T _e (°C)	66,4
AASHTO T313	T _b (°C)	-36,6
	Module de rigidité S ₀ (60 MPa)	125
Charte viscosité/température	Température de malaxage (°C)	156 à 170
	Température de compactage (°C)	164 ± 2

3.2 Description des enrobés confectionnés

La formulation de l'enrobé ESG-14 étudié a été calée à celle d'un enrobé ESG14 existant. Cette formulation est présentée à l'ANNEXE I. En laboratoire, cette formulation d'enrobé a également été reproduite à titre d'enrobé de référence.

3.2.1 Exigences granulométriques de l'enrobé ESG-14

La méthode de formulation LC du ministère des Transports fixe des points de contrôle ainsi qu'une zone de restriction quant à la granulométrie de l'enrobé. La courbe granulométrique du combiné doit se situer entre les points de contrôle et ne doit pas passer dans la zone de restriction.

De plus, un nombre minimum de classes granulaires distinctes doit être utilisé pour la confection de l'EB, soit trois pour un EB de type ESG-14. La Figure 3.1 illustre la courbe granulométrique de l'EB de référence ainsi que les différents points de contrôle et la zone de restriction applicable à l'enrobé ESG-14 étudié.

3.2.2 Dosage des enrobés bitumineux avec particules de verre de post-consommation

Au total, cinq EB avec différents dosages en particules de verre ont été étudiés : 5, 10, 15, 20 et 25% (% massique). Afin de minimiser l'effet de la granularité sur les performances des EB confectionnés avec particules de verre, le choix des différents dosages en verre s'est fait en substituant des granulats par des particules de verre de façon à reproduire la courbe granulométrique de l'EB de référence selon les pourcentages massiques passant aux divers tamis. La Figure 3.1 illustre les zones où les granulats ont été substitués par des particules de verre. Les courbes granulométriques obtenues pour chacun des EB confectionnés avec des particules de verre sont comparables à celle de l'EB de référence. Les courbes granulométriques sont présentées à l'ANNEXE IV. Le Tableau 3.4 présente les principales caractéristiques des EB étudiés.

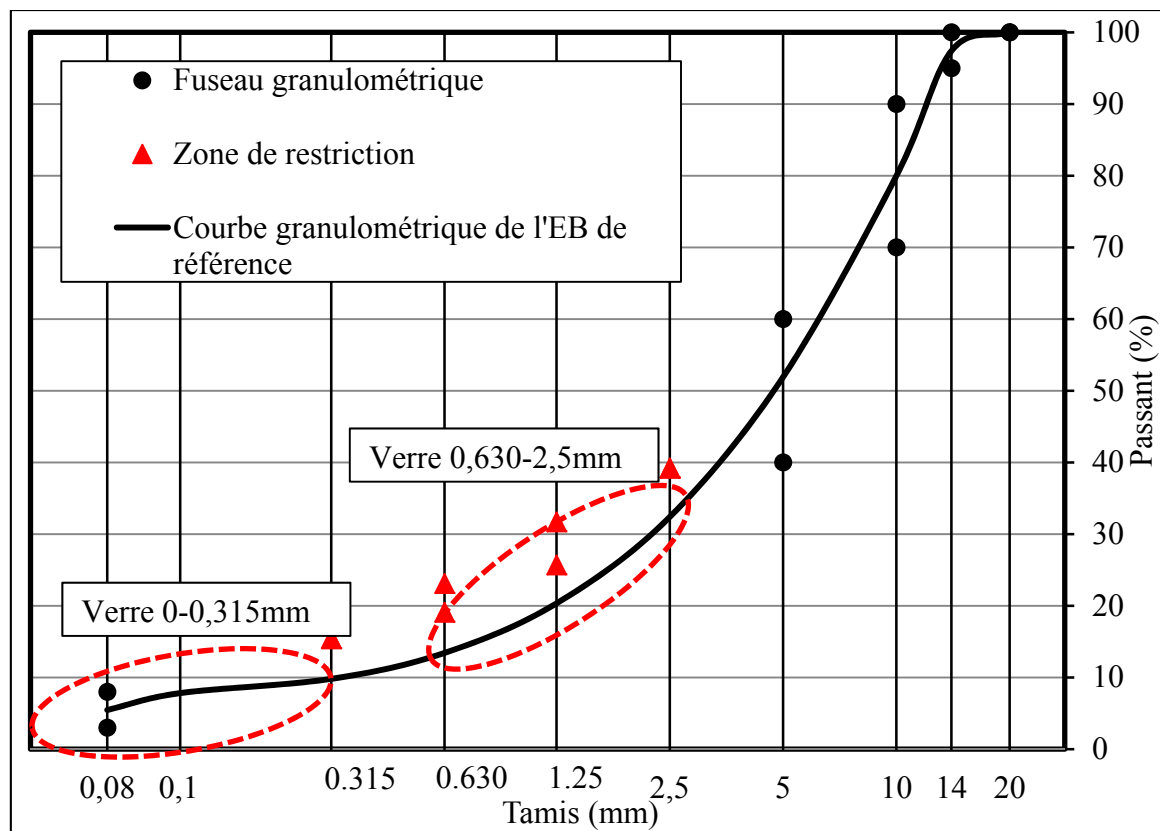


Figure 3.1 Points de contrôle, zone de restriction et courbe granulométrique de l'enrobé de référence ESG-14

Tableau 3.4 Caractéristiques des enrobés bitumineux

Enrobé		ESG14 R	ESG14 V-5	ESG14 V-10	ESG14 V-15	ESG14 V-20	ESG1 4V-25
Dosage en verre (% massique de la masse totale de granulat)		0	5	10	15	20	25
Tamisat (%)	20 mm	100	100	100	100	100	100
	14 mm	97	97	97	97	97	97
	10 mm	80	80	80	80	80	80
	5 mm	52	52	52	47	47	44
	2,5 mm	32	34	36	34	36	36
	1,25 mm	20	20	21	20	19	20
	0,630 mm	13	12	12	12	11	12
	0,315 mm	9,8	8,6	9,3	10	8,9	11
	0,125 mm	7,8	6,8	7,7	8,7	7,7	9,9
	0,080 mm	5,5	4,7	5,3	6,0	5,3	6,8
Proportions des classes granulaires (%)	10-14	20	20	20	20	20	20
	5-10	29	29	29	35	35	39
	0-5 non lavé	23	18	13	5	0	0
	0-5 lavé	28	28	28	25	25	16
	Verre 0,630- 2,5	0	5	8	10	15	17
	Verre 0-0,315	0	0	2	5	5	8
Abs (%) calculé en eau du combiné		0,62	0,60	0,57	0,54	0,52	0,49
% bitume d'ajout par rapport à la masse totale		4,96	4,88	4,81	4,73	4,97	4,79
V _{be} (%)		11,44	11,36	11,31	11,30	11,41	11,42
d _{gb} combiné		2,718	2,706	2,695	2,685	2,673	2,663
d _{mm}		2,533	2,522	2,511	2,500	2,492	2,478

3.3 Confection des enrobés en laboratoire

Afin de réaliser les différents essais de formulation et de performances, des éprouvettes de différentes dimensions ont été confectionnées en laboratoire. La fabrication d'un enrobé implique le malaxage des granulats et du bitume. Pour cerner le dosage en bitume d'ajout en fonction d'un V_{be} cible constant et du dosage en particules de verre dans l'EB, des gâchées de moins de 10 kg ont été confectionnées dans un malaxeur à batteur circulaire. Pour évaluer les performances thermomécaniques des EB il faut confectionner des plaques de dimensions importantes nécessitant des masses plus conséquentes de matériau. Pour ce faire un malaxeur thermo régulé d'une capacité de 60 kg a été utilisé.

3.3.1 Malaxage des enrobés

Avant le malaxage des gâchées de moins de 10 kg, les granulats, le bol ainsi que le batteur du malaxeur sont placés à l'étuve jusqu'à ce qu'ils atteignent une température de 180 °C, soit la limite maximale permise par la méthode de formulation LC.

Parallèlement, le bitume est chauffé en étuve jusqu'à la température de malaxage (168 °C). Le choix des températures de chauffage s'est fait selon la méthode LC 26-003. Par contre, dans le cas des gâchées confectionnées dans le malaxeur thermo régulé, les granulats ont été chauffés à même le malaxeur, à la température de malaxage, soit 168 °C. L'utilisation d'un malaxeur thermo régulé limite les pertes de chaleur lors de la fabrication de l'EB. Le Tableau 3.5 présente les différentes températures cibles retenues pour la confection des enrobés en laboratoire.

Tableau 3.5 Températures cibles pour la fabrication des enrobés en laboratoire

Matériaux et matériel		Température de chauffage (°C)	Équipement utilisé pour le chauffage
Bitume		168 ± 2	Étuve
Gâchée < 10 kg	Granulats	180 ± 2	Étuve
	Bol et batteur		
Gâchée > 10 kg	Granulats	168 ± 2	Malaxeur thermo régulé

Pour toutes les gâchées de moins de 10 kg, la séquence de malaxage suivie est :

1. Introduction dans le bol chauffé des granulats chauds;
2. Malaxage manuel des matériaux (homogénéisation);
3. Formation de cratère au centre des granulats;
4. Ajout du bitume à $168^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
5. Installation du bol et du batteur sur le malaxeur;
6. Malaxage à la vitesse 1 des matériaux pour une durée de 45 à 60 secondes;
7. Raclage du fond ainsi que de la paroi du bol (arrêt ~ 10 secondes);
8. Malaxage de l'enrobé à la vitesse 1 pour une durée de 15 à 30 secondes.

Pour les gâchées réalisées dans le malaxeur thermo régulé, la séquence de malaxage suivie est :

1. Introduction des granulats froids dans le malaxeur;
2. Chauffage des granulats jusqu'à la température cible;
3. Formation de cratère au centre des granulats;
4. Ajout du bitume à $168^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$;
5. Malaxage à la vitesse de 45 r.p.m. pour une durée de 60 secondes;
6. Raclage du fond ainsi que de la paroi du malaxeur;
7. Malaxage à la vitesse de 45 r.p.m. pour une durée de 45 secondes.

Une fois l'EB malaxé, celui-ci est placé à l'étuve à la température de compactage (160 °C) tel que prescrit dans les différentes méthodes d'essai, et ce, dans une panne recouverte pour limiter l'oxydation du bitume. La durée de la cure est choisie en fonction de l'essai à réaliser avec l'EB tel qu'indiqué au Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Temps de cure à l'étuve des enrobés pour les différents essais réalisés

Essai	Durée de la cure en étuve à la température de compactage (minutes) selon les différentes méthodes d'essai LC
Densité maximale (d_{mm})	120
Aptitude au compactage (PCG)	30 à 120
Résistance à l'orniérage	60
E*, TSRST et Fatigue	240

3.3.2 Fabrication des éprouvettes

Afin de fabriquer les différentes éprouvettes nécessaires à la réalisation des essais de performances, des plaques d'enrobés ont été compactées avec l'aide du compacteur de plaques MLPC. Le compactage s'est fait selon une séquence de compactage prédéterminée en fonction des dimensions de la plaque.

3.3.2.1 Éprouvettes pour l'essai de résistance à l'orniérage

La fabrication des plaques destinées à l'essai de résistance à l'orniérage s'est faite selon la méthode d'essai LC 26-400. Pour chaque EB testé, deux plaques de 100 x 180 x 500 mm³ ont été fabriquées. Les plaques ont été testées simultanément à l'orniéreur MLPC. Le compactage des plaques s'est fait à une température de 160 °C en visant une compacité de 95 % comme prescrit dans la méthode d'essai. Suite au compactage, les plaques sont laissées à la température de la pièce pour une période minimale de 48 heures avant la réalisation de l'essai à l'orniéreur. La compacité effective de chacune des plaques confectionnées a été déterminée

suivant la méthode de pesée hydrostatique élaborée au LCMB qui consiste à peser les plaques dans l'air et dans l'eau.

3.3.2.2 Éprouvettes pour les essais thermomécaniques (TM)

Les essais thermomécaniques (TM) sont réalisés pour l'EB de référence et l'EB avec dosage optimal en verre sur des éprouvettes cylindriques carottées dans des plaques d'enrobés de 125 x 400 x 600 mm³. La Figure 3.2 illustre le calendrier de fabrication et de carottage des plaques confectionnées pour ces essais. Afin de minimiser les pertes et de maximiser le nombre d'éprouvettes, un patron de sciage et de carottage a été élaboré tel qu'illustré à la Figure 3.3. Le sciage s'est fait avec l'aide d'une lame à diamant. Les quatre parois de la plaque ont été rejetées sur une épaisseur de 25 mm afin de limiter les effets de parois et éviter ainsi les vides supplémentaires au sein des éprouvettes. De plus, une partie de la plaque a été sciée et mise de côté pour permettre le carottage d'éprouvettes supplémentaires si nécessaire.

Une fois le sciage et le carottage effectués, les éprouvettes ont été placées dans une rectifieuse afin de rendre les deux extrémités parfaitement lisses et parallèles l'une à l'autre. Par la suite, les éprouvettes ont été identifiées selon une nomenclature propre au projet telle que définie à la Figure 3.4. Finalement, les dimensions des éprouvettes ont été relevées (trois mesures pour le diamètre et trois mesures pour la hauteur) pour des fins d'analyses, de même que la compacité qui a été déterminée selon la méthode de pesée hydrostatique. Les caractéristiques des éprouvettes sont données au Tableau 3.7.

Après le carottage, les éprouvettes ont été placées dans un bac de sable durant une période minimale de deux semaines. Le fait d'entreposer sur lit de sable les éprouvettes avant de les tester permet de limiter le risque de fluage. Pour réaliser les essais TM, il est nécessaire de coller des casques en aluminium aux extrémités planes des éprouvettes pour le montage sur la presse hydraulique. Le collage est une étape très importante dans le processus de réalisation d'un essai. Cela demande beaucoup de minutie et de précaution afin de ne pas abîmer l'éprouvette. Les casques sont collés à l'éprouvette avec de la colle à l'Époxy. Dans

le cadre de ce projet, le collage s'est effectué en deux étapes. On colle un premier casque avec l'aide d'un banc de collage développé au LCMB. Par la suite, le deuxième casque est collé directement sur la presse hydraulique avant le début de l'essai. Cette procédure permet d'assurer un alignement parfait par rapport à l'axe du vérin, d'obtenir un bon parallélisme entre les extrémités et de limiter la torsion sur l'éprouvette lors du serrage des casques sur la presse hydraulique.

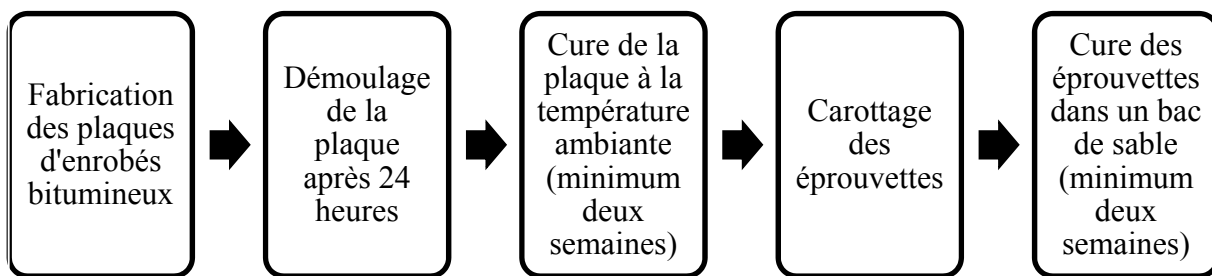


Figure 3.2 Cure des plaques destinées au carottage des éprouvettes

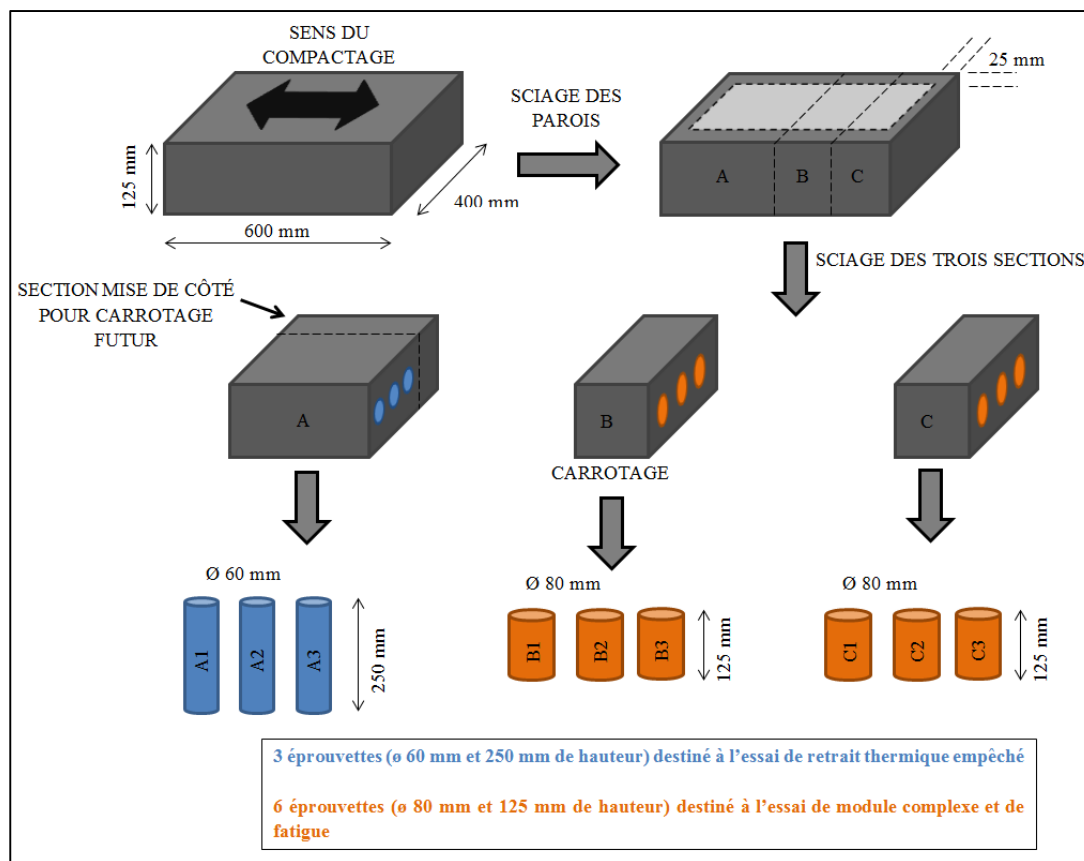


Figure 3.3 Patron de carottage

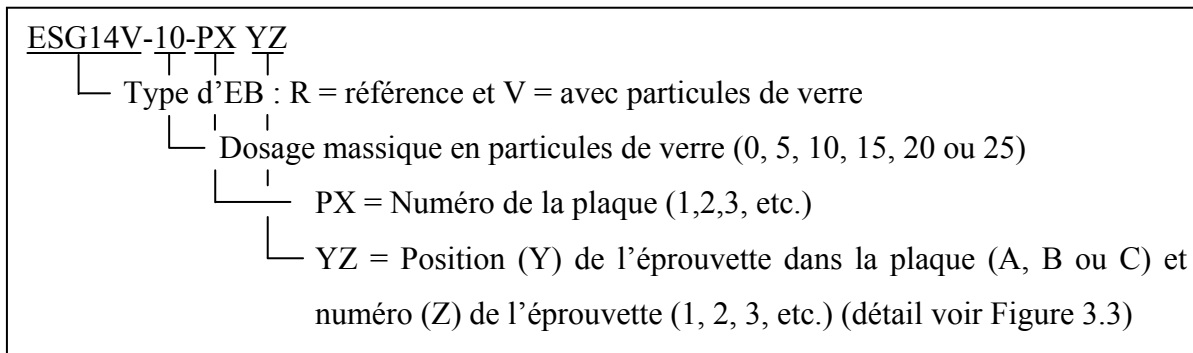


Figure 3.4 Nomenclature pour les éprouvettes

Tableau 3.7 Caractéristiques physiques des éprouvettes testées

numéro	Éch.	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	d _{mb}	d _{mm}	% de vides	Essai
ESG14R	P2A1	248,9	59,8	1685,3	2,433	2,533	4,0	TSRST
	P2A2	249,2	59,9	1665,8	2,404		5,1	TSRST
	P2A3	248,8	59,8	1670,5	2,414		4,7	TSRST
	P2B1	122,6	74,1	1255,4	2,394		5,5	E*/FAT
	P2B2	125,3	74,2	1295,8	2,422		4,4	FAT
	P2B3	118,7	74,2	1215,8	2,395		5,4	E*/FAT
	P2C1	124,2	74,2	1280,5	2,413		4,7	FAT
	P2C2	125,0	74,3	1286,1	2,407		5,0	FAT
	P2C3	123,79	73,99	1269,7	2,398		5,3	FAT
ESG14V-10-B	P2A1	245,2	59,8	1613,1	2,369	2,525	6,2	TSRST
	P2A2	246,1	59,8	1631,4	2,386		5,5	TSRST
	P2A3	246,9	59,8	1640,8	2,390		5,3	TSRST
	P2B1	123,9	74,2	1270,4	2,399		5,0	E*/FAT
	P2B2	125,3	74,2	1289,0	2,415		4,4	FAT
	P2B3	125,1	74,2	1293,4	2,418		4,2	FAT
	P2C1	123,7	74,1	1263,9	2,392		5,3	FAT
	P2C2	118,2	74,1	1213,7	2,405		4,8	E*/FAT
	P2C3	115,2	74,3	1179,3	2,398		5,0	FAT

TSRST = Essai de résistance au retrait thermique empêché

* = Essai de détermination du module complexe

FAT= Essai de résistance à la fissuration par fatigue

3.3.2.3 Éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau

Les éprouvettes utilisées pour la mesure de la tenue à l'eau ont été confectionnées selon la méthode d'essai LC 26-020 *Préparation d'éprouvettes pour la méthode Marshall*. Une fois la compaction terminée, une période de repos de 12 heures est nécessaire avant de procéder aux essais de tenue à l'eau. Dans le cas où la hauteur de l'éprouvette diffère de la valeur ciblée, un facteur de correction est appliqué lors du calcul de la stabilité. Le Tableau 3.8 présente les caractéristiques physiques des éprouvettes utilisées pour la mesure de la tenue à l'eau.

Tableau 3.8 Caractéristiques des éprouvettes pour la mesure de la tenue à l'eau

Enrobé	Éch.	Hauteur (mm)	Masse (g)	d _{mb}	d _{mm}	% de vides
ESG-14R	R1	62,9	1222,1	2,468	2,533	2,2
	R2	61,0	1196,5	2,472		2,1
	R3	65,8	1284,8	2,468		2,3
	R4	67,1	1307,7	2,462		2,5
	R5	63,2	1237,5	2,464		2,4
	R6	65,8	1281,0	2,457		2,7
ESG14V-10-B	V1	63,8	1238,0	2,440	2,525	3,3
	V2	68,4	1311,0	2,417		4,3
	V3	59,7	1141,5	2,418		4,2
	V4	66,1	1285,0	2,430		3,8
	V5	62,5	1194,6	2,420		4,2
	V6	65,6	1263,7	2,429		3,8

3.4 Description et procédure des différents essais réalisés

La présente section décrit les essais réalisés ainsi que les procédures employées dans le cadre de ce projet.

3.4.1 Formulation

La formulation des EB est déterminée en considérant la masse et la densité des constituants utilisés au malaxage et la densité maximale mesurée sur l'EB. La densité maximale permet d'obtenir les volumes respectifs de chacun des constituants. De plus, suivant la méthode de formulation LC, l'aptitude au compactage de l'EB est évaluée au moyen de la presse à cisaillement giratoire (PCG). La PCG permet de vérifier l'aptitude au compactage de l'EB pour sa mise en œuvre. L'essai de détermination de la densité maximale ainsi que l'essai d'évaluation de l'aptitude au compactage font partie des exigences de la norme 4202 : *Enrobés à chaud formulés selon la méthode de formulation du Laboratoire des Chaussées*. Ces essais seront décrits dans la présente section.

3.4.1.1 Essai de détermination de la densité maximale

Le principe de l'essai visant à déterminer la densité maximale (d_{mm}) de l'EB est fondé sur le principe d'Archimède et consiste à mesurer la densité d'un échantillon d'EB sans aucun vide. La densité maximale permet de déterminer les proportions réelles de l'EB confectionné et de valider le V_{be} . La d_{mm} est déterminée à partir de la méthode d'essai LC 26-045 : *Détermination de la densité maximale*.

La densité maximale permet de déterminer le volume réel de bitume absorbé. À partir du volume réel de bitume absorbé, le volume de bitume effectif est obtenu et le pourcentage de bitume d'ajout (b%) est fixé de manière à satisfaire l'exigence du MTQ quant au V_{be} , laquelle correspond à $11,4 \% \pm 0,1\%$ pour l'enrobé ESG-14.

3.4.1.2 Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire

Le principe de l'essai visant à évaluer l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire permet d'évaluer la maniabilité d'un EB. L'essai permet de suivre l'évolution de la teneur en vides d'une éprouvette d'EB en cours de compaction. L'essai est réalisé suivant la méthode d'essai LC 26-003 : *Détermination de l'aptitude au compactage des enrobés à chaud à la presse à cisaillement giratoire*. Les critères à respecter pour l'EB ESG-14 au niveau des vides à la PCG sont présentés dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9 Exigences relatives à l'essai d'aptitude au compactage à la PCG pour un enrobé ESG-14

Critère (Nombre de girations)	Exigence (% de vides)
10	$\geq 11,0$
100	4,0 à 7,0
200	$\geq 2,0$

Tel que décrit à la section 1.4.3.1, le N_{design} varie en fonction du type d'EB testé. Pour un EB de type ESG-14, il correspond à 100 girations. En plus de respecter les exigences relatives aux pourcentages de vides, l'éprouvette ne doit pas présenter de ressuage de bitume après les 200 girations.

3.4.2 Essais thermomécaniques (TM)

Les essais TM visent à étudier les propriétés mécaniques d'un matériau en fonction de différentes conditions thermiques. Dans le cadre de ce projet, les essais thermomécaniques réalisés sont : résistance à l'orniérage, résistance au retrait thermique empêché (TSRST), détermination du module complexe (E^*), résistance à la fissuration par fatigue (FAT).

3.4.2.1 Résistance à l'orniérage

L'essai de résistance à l'orniérage vise à évaluer le potentiel d'un EB à se déformer de façon permanente. Pour ce faire, une plaque d'EB compactée en laboratoire avec le compacteur de plaques MLPC est soumise au passage répété d'une charge roulante dans une enceinte thermo régulée. Au Québec, c'est l'orniéreur MLPC qui est utilisé et l'essai est réalisé selon la méthode d'essai LC 26-410 : *Résistance à la déformation des enrobés à l'essai d'orniérage*. La température d'essai est fixée suivant la température haute de la classe de bitume utilisé pour la confection de l'EB, avec une valeur limite maximale fixée à 60°C. Pour les enrobés étudiés, la température d'essai est de 60°C. Cette température est celle mesurée avec une sonde de température placée dans une des deux plaques testées suivant la position décrite dans la méthode d'essai. La mesure de la profondeur des ornières est relevée périodiquement, suivant des cycles de sollicitation prédéterminés, en cours d'essai en plusieurs points (15) et les résultats sont exprimés en pourcentage à l'épaisseur initiale de la plaque testée. Les exigences par rapport à la résistance à l'orniérage sont présentées au Tableau 3.10.

Tableau 3.10 Exigences relatives à la résistance à l'orniérage

Type d'enrobé		Couche de base	Couche de surface
Épaisseur des plaques (mm)		100	50
Profondeur moyenne des ornières (%)	1,000 cycles	S.O.	≤ 10,0 %
	3,000 cycles	S.O.	≤ 20,0 %
	30,000 cycles	≤ 10,0 %	S.O.

Pour un EB de type ESG-14, l'exigence est fixée à 30 000 cycles. Dans le cadre de ce projet, les profondeurs d'ornière ont été relevées après 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles. De cette façon, il est possible de tracer l'évolution de la profondeur moyenne des ornières. Les paramètres de l'essai de résistance à l'orniérage sont présentés au Tableau 3.11.

Tableau 3.11 Paramètres de l'essai de résistance à l'orniérage

Pression du pneumatique (kPa)	600 ± 30
Course du pneumatique par rapport à l'éprouvette (mm)	410 ± 5
Fréquence du cycle (aller/retour) (Hz)	1
Charge roulante appliquée (kN)	$5 \pm 0,05$
Écart entre l'axe de la trace et l'axe théorique de l'éprouvette (mm)	< 5
Angle d'environnement (°)	$0,0 \pm 0,5^\circ$
Température de l'essai pour un bitume PG 64-34P (°C)	60 ± 2
Période de conditionnement à la température d'essai (heures)	12 à 13

3.4.2.2 Résistance à la fissuration thermique : retrait thermique empêché

L'essai de retrait thermique empêché vise à évaluer la résistance à la fissuration à basse température d'un EB. Comme il a été mentionné à la section 1.5.3, l'EB se contracte lors d'une baisse de la température et lorsque les déplacements sont empêchés, des contraintes sont engendrées au sein du matériau. Afin de simuler ce phénomène, une éprouvette d'EB est fixée à une presse hydraulique qui empêche sa variation de hauteur. L'éprouvette est ensuite soumise à un taux de refroidissement continu. Étant donné que la contraction de l'éprouvette est empêchée, il y a ainsi formation de contrainte de traction au sein de l'éprouvette. La rupture du matériau survient lorsque la contrainte de traction induite dépasse la limite de résistance en traction de l'éprouvette. En cours d'essai, on s'assure de faire l'acquisition en continu de la température et de la force requise pour maintenir l'éprouvette à sa longueur initiale. Les résultats sont ensuite portés en graphique en vue de tracer la variation de contrainte en fonction de la variation de température.

Selon Di Benedetto et Corté (2005), cet essai est représentatif du comportement aux basses températures des EB en service puisqu'il y a similitude entre les sollicitations appliquées lors de l'essai et celles qui sont responsables de la fissuration à basse température des chaussées.

En effet, au sein d'une chaussée d'EB, les mouvements dus à la contraction thermique sont partiellement restreints. Cela est un facteur responsable de la fissuration transversale particulièrement dans les régions à climat nordique.

La Figure 3.5 présente un résultat type obtenu suite à la réalisation d'un essai de retrait thermique empêché. Les paramètres obtenus suite à un essai de retrait thermique empêché sont (Meunier, 2005):

- contrainte maximale de rupture;
- température associée à la contrainte de rupture;
- température de transition vitreuse
- température de transition bissectrice
- pente #1;
- pente #2.

Dans le cadre de ce projet, les essais de résistance au retrait thermique empêché ont été réalisés suivant la norme AASHTO TP10-93 (Standard Test Method for Thermal Stress Restrained Specimen Tensile Strength). Les différents paramètres de l'essai sont présentés dans le Tableau 3.12. À noter que dans le cadre de ce projet, la durée de conditionnement utilisée a été de 5 heures au lieu de la période de 6 heures prescrit par la norme.

Tableau 3.12 Paramètres de l'essai de retrait thermique empêché

Paramètres	Exigences norme AASHTO
Diamètre des échantillons (mm)	60 ± 5
Longueur des échantillons (mm)	250 ± 5
Taux de refroidissement ($^{\circ}\text{C}/\text{h}$)	10 ± 1
Température de départ ($^{\circ}\text{C}$)	5 ± 2
Durée du conditionnement (h)	$6 \pm 0,5$

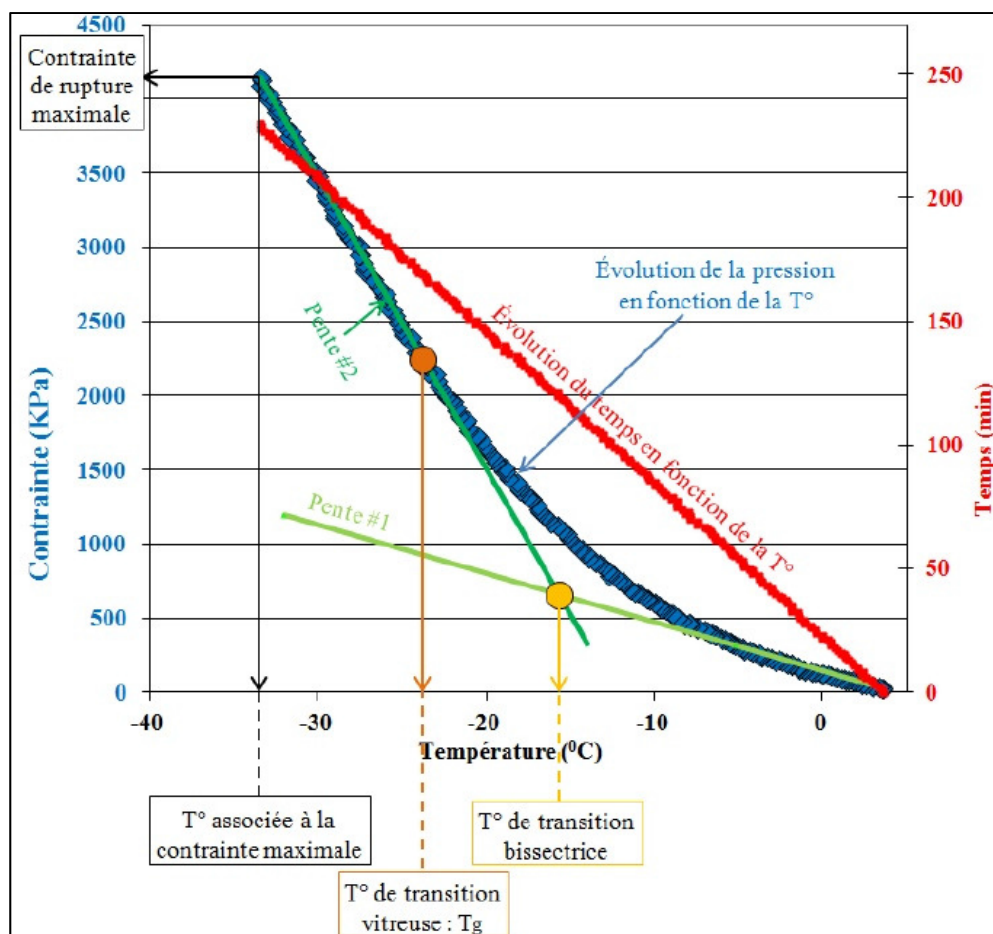


Figure 3.5 Résultat type d'un essai de retrait thermique empêché
Tirée de Meunier (2005)

3.4.2.3 Détermination du module complexe

La détermination du module complexe vise à quantifier dans le domaine des petites déformations la rigidité d'un EB en imposant un chargement cyclique de tension-compression. Étant donné le comportement viscoélastique des EB, la dépendance de la rigidité est évaluée selon plusieurs températures et fréquences de sollicitation.

Dans le cadre de ce projet, l'essai de détermination du module complexe s'est fait en contrôle de déformation. La déformation imposée est de $50 \mu\text{def}$ et est mesurée avec l'aide de trois extensomètres. L'essai est réalisé selon plusieurs températures allant de -35°C à 35°C et

plusieurs fréquences allant de 0,01 Hz à 10 Hz. Entre chaque changement de température, une période de conditionnement de 4 heures est nécessaire pour s'assurer de l'uniformité de la température au sein de l'éprouvette. Les paramètres d'essai sont présentés au Tableau 3.13.

Tableau 3.13 Paramètre d'essai pour la détermination du module complexe

Paramètres	Mesures
Hauteur des éprouvettes (mm)	120 ± 5
Diamètre des éprouvettes (mm)	75 ± 5
Températures d'essais (°C)	-35; -25; -15; -5; 5; 15; 25; 35
Fréquences d'essais (Hz)	0,01; 0,03; 0,1; 0,3; 1; 3; 10

3.4.2.4 Résistance à la fatigue

La mesure de la résistance à la fatigue d'un EB consiste à déterminer la durée de vie d'une série d'éprouvettes d'EB soumise à des sollicitations répétées en vue d'en déterminer la loi de fatigue, soit la loi de Wöhler. Il existe plusieurs méthodes d'essai qui permettent d'évaluer la durée de vie en fatigue d'un EB. Dans le cadre de ce projet, les essais ont été réalisés en contrôle de déformation sur des éprouvettes cylindriques soumises à des cycles de traction-compression. À noter que certaines des éprouvettes utilisées pour l'essai de résistance à la fatigue ont aussi été utilisées pour les essais de détermination du module complexe. La procédure de l'essai de fatigue a été développée au DGCB de l'ÉNTPE. Tous les essais ont été réalisés à 10°C et à une fréquence de 10 Hz. L'amplitude de déformation imposée varie d'une éprouvette à l'autre. Pour permettre l'obtention de la droite de Wöhler, il faut plusieurs essais réalisés à des valeurs d'amplitude différentes. Dans le cadre de ce projet, les amplitudes de déformation utilisées varient entre 210 et 255 $\mu\text{m/m}$.

Deux critères de durée de vie sont utilisés, soit : 1) Critère de rupture classique ($N_{f50\%}$), 2) Critère de transition phase II/III (N_{fIII}). Comme mentionné à la section 1.5.4.2, le critère classique considère la rupture de l'éprouvette lorsque le module chute de 50 % de la valeur initiale. La valeur de module initiale ne doit pas être la première valeur de module calculé,

car en début d'essai la stabilisation de la déformation imposée nécessite un certain nombre de cycles. Pour ce projet, la valeur de la norme du module initial utilisée est associée à la valeur de la norme du module extrapolée linéairement en considérant les valeurs de module des cycles 50 à 300, tel que défini par Nguyen (2010).

3.4.3 Essai de mesure des caractéristiques physiques

Les essais de mesure des caractéristiques physiques visent à évaluer des caractéristiques propres à un EB en particulier. Dans le cadre de ce projet, les essais d'évaluation de la macro texture par hauteur de sable et la mesure d'adhérence au pendule SRT ont été réalisés.

3.4.3.1 Évaluation de la macro texture par hauteur de sable

Le principe de l'essai d'évaluation de la macro texture par mesure de la hauteur de sable consiste à évaluer la profondeur moyenne de la macro texture d'un EB. Pour ce projet, l'essai a été réalisé selon la norme ASTM E965-96 : *Standard Test Method for Measuring Pavement Macrottexture Depth using a volumetric technique*. La procédure consiste à déposer en tas un volume (V) connu d'un granulat sur la surface d'une couche d'EB, d'étendre uniformément le granulat en surface suivant une surface circulaire uniforme et de mesurer le diamètre de la surface ainsi couverte. Le granulat de mesure utilisé est du sable d'Ottawa dont la granularité est uniforme, pour un diamètre moyen de 750 μm et une densité de 2,65. La manipulation doit être répétée à quatre endroits différents en surface de la couche d'EB et ce, à des distances égales.

Dans le cadre de ce projet, les mesures ont été réalisées sur des plaques d'enrobés destinés à l'essai d'orniéreur. À noter qu'une seule mesure par plaque d'EB a été relevée. Une fois le granulat étendu sur la surface de l'EB, le diamètre de la surface couverte est mesuré. Par la suite, connaissant le volume de granulat utilisé, la profondeur moyenne de macro texture (PMM) est calculée avec l'équation (3.1). Les valeurs calculées permettent de comparer directement les résultats entre deux EB.

$$PMM = \frac{4 \times V}{\pi \times D^2} \quad (3.1)$$

Où les paramètres sont les suivants :

PMM	→	profondeur moyenne macro texture (mm);
V	→	volume du matériau de mesure (mm ³);
D	→	diamètre de la surface couverte par le matériau de mesure (mm)

3.4.3.2 Mesure de l'adhérence au pendule SRT

Le principe de l'essai de mesure d'adhérence au pendule SRT repose sur la mesure de la force de friction d'un frottement entre du caoutchouc et la surface d'une plaque d'EB mouillée. C'est un essai non destructif qui permet de quantifier le potentiel d'adhérence d'un pneu à la surface d'un EB. Il est possible de réaliser cet essai soit en laboratoire ou bien in situ. L'appareil est composé d'un pendule relié à une échelle de mesure telle qu'illustrer à la Figure 3.6. La procédure consiste à laisser tomber le bras du pendule portant un caoutchouc et de mesurer la remontée du pendule après frottement sur la surface de l'EB. Les résultats obtenus sont présentés sur une échelle arbitraire allant de 0 à 100. Plus la valeur obtenue est petite, plus le matériau est rugueux et par le fait même, plus le potentiel d'adhérence du pneu à la surface de la chaussée est élevé.



Figure 3.6 Pendule SRT

3.4.4 Essai de durabilité

La durabilité d'un matériau est caractérisée par la propriété de celui-ci à résister aux facteurs destructifs tels que l'eau. Dans le cadre de ce projet, l'essai de la tenue à l'eau a été réalisé.

3.4.4.1 Tenue à l'eau

L'essai de la tenue à l'eau vise à évaluer la chute de la résistance mécanique d'un EB soumis à un vieillissement accéléré. Dans le cadre de ce projet, l'essai a été réalisé selon la méthode d'essai LC 26-001 : *Tenue à l'eau par trempage*. L'essai consiste à mesurer la stabilité Marshall d'éprouvettes d'EB divisé en deux lots : A et B selon la méthode d'essai LC 26-060 *Méthode Marshall de détermination de la résistance à la déformation des éprouvettes*. Les éprouvettes destinées à l'essai de tenue à l'eau sont fabriquées en laboratoire. Suite au compactage et au démoulage, les éprouvettes doivent être laissées à l'air ambiant de façon à éviter toute déformation, et ce, pendant une période minimale de 12 heures.

Le premier lot d'éprouvettes, soit le lot A, subit un vieillissement accéléré par trempage dans l'eau à 60°C pendant 24 heures. Le deuxième lot, soit le lot B, ne subit pas de vieillissement accéléré. La mesure de la stabilité Marshall est réalisée sur les deux lots d'éprouvettes à 60°C. Les éprouvettes du lot A sont testées après la période de 24 heures tandis que les éprouvettes du lot B sont conditionnées à 60°C pendant une période de 30 à 40 minutes. La tenue à l'eau est caractérisée par la stabilité Marshall conservée entre les deux états selon l'équation (3.2).

$$\text{Tenue à l'eau (\%)} = \frac{AT}{ST} \times 100 \quad (3.2)$$

Où selon la méthode d'essai LC 26-001, les paramètres sont les suivants :

AT	→	Stabilité des éprouvettes avec trempage à 60°C
ST	→	Stabilité des éprouvettes sans trempage

CHAPITRE 4

PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans ce chapitre, la première partie traitera des essais réalisés afin d'étudier l'effet du dosage en verre sur les critères de formulation (V_{be} et V_i) et de résistance à l'orniérage. Dans la deuxième partie, le choix du dosage optimal en particules de verre sera présenté. Finalement, les résultats des essais d'évaluation des performances, des caractéristiques physiques et de la durabilité pour l'EB ESG14 de référence et l'EB ESG14 avec dosage optimal de particules de verre seront présentés et discutés.

4.1 Sommaire des essais réalisés

Le Tableau 4.1 présente le sommaire des essais réalisés dans le cadre de ce projet.

Tableau 4.1 Sommaire des essais effectués

Essais	Nombre d'éprouvettes testées par EB	
	ESG14R	ESG-14V-10-B
Presse à cisaillement giratoire	3	2
Orniéreur	2	1
TSRST	3	3
Module complexe	2	2
Fatigue	5	5
Macrotexture ¹	1	1
Adhérence ²	1	1
Tenue à l'eau	6	6
1. Trois mesures réalisées sur une seule éprouvette		
2. Quatre mesures sur une seule éprouvette		

4.2 Phase I - étude du dosage en verre

L'étude du dosage en verre a été réalisée sur l'EB ESG14 au moyen des essais suivants : 1) Densité maximale, 2) Aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire, 3) Résistance à l'orniérage. Cinq dosages en particules de verre ont été étudiés. Les résultats de ces essais sont présentés dans la section suivante.

4.2.1 Caractéristiques volumétriques

Dans la méthode de formulation LC, le V_{be} est fixé pour chaque type d'EB, sans contrainte sur le dosage en bitume. Pour cerner le volume de bitume absorbé (V_{ba}) et le volume de bitume effectif (V_{be}) pour les enrobés étudiés, il est nécessaire de déterminer la densité maximale (d_{mm}) respective à chacun des enrobés. Dans le cadre de ce projet, un minimum de deux essais a été réalisé pour déterminer la densité maximale de chacun des enrobés étudiés. Les résultats des d_{mm} sont présentés au Tableau 4.2. Les résultats montrent que la densité maximale de l'EB diminue au fur et à mesure que le dosage en particules de verre augmente, permettant ainsi de diminuer le dosage en bitume d'ajout dans l'enrobé, et ce, pour un V_{be} donné. Cela est en partie dû au fait que le verre possède une absorption inférieure à celle des granulats conventionnels.

Tableau 4.2 Résultats des essais de d_{mm}

Dosage total massique (%)	d_{mm} moyenne	Écart maximal	Nombre d'essais	b (%)	V_{be} (%)	Date de réalisation de l'essai
0	2,533	0,000	3	4,96	11,44	21 mars 2013
5	2,522	0,005	3	4,88	11,36	14 août 2013
10	2,516	0,009	2	4,88	11,20	26 juin 2013
	2,503	0,002	2	4,96	11,73	3 juillet 2013
	2,511	0,006	2	4,81	11,31	22 juillet 2013
15	2,494	0,008	3	4,88	11,64	8 août 2013
	2,500	0,005	3	4,73	11,30	14 août 2013
20	2,500	0,009	2	4,88	11,04	5 juin 2013
	2,489	0,001	2	5,02	11,56	6 juin 2013
	2,497	0,003	2	4,93	11,20	27 juin 2013
	2,494	0,001	2	4,97	11,34	29 juin 2013
	2,492	0,007	2	4,97	11,41	18 juillet 2013
25	2,475	0,006	2	4,89	11,62	29 juin 2013
	2,478	0,001	2	4,79	11,42	22 juillet 2013

Lors de l'analyse des résultats d'essais de d_{mm} , il est important de prendre en compte l'écart maximal entre deux valeurs pour un même EB. Selon la méthode d'essai LC 26-045 « Détermination de la densité maximale », l'écart maximal acceptable entre deux essais est de 0,011. Dans le Tableau 4.2, les plus grands écarts obtenus entre deux essais sont présentés en rouge. On remarque que l'écart maximal obtenu entre deux essais varie entre 0 et 0,009, ce qui est conforme aux exigences de la méthode d'essai, mais demeure élevé de notre point de vue. En effet, une variation de la valeur du d_{mm} influe directement sur la valeur du V_{be} . Afin d'illustrer l'impact de la variation de la d_{mm} sur le calcul du V_{be} , le Tableau 4.3 présente l'erreur relative d'un essai par rapport à l'autre obtenu pour les d_{mm} réalisés le 5 juin 2013 sur

l'EB avec 20 % de verre. Les résultats montrent qu'un écart de 0,009 entre deux essais de d_{mm} représente une erreur relative inférieure à 0,4 %, ce qui se traduit par une erreur relative beaucoup plus significative à l'échelle du V_{be} , laquelle se chiffre autour de 2,9 %. Il est donc important d'obtenir l'écart le plus faible possible entre deux valeurs lors de la réalisation des essais d_{mm} afin de minimiser l'erreur liée au calcul du V_{be} .

Tableau 4.3 Exemple de l'influence de la variation des résultats de d_{mm} sur le calcul du V_{be}

# d'essai	d _{mm}	b (%)	V _{be} (%)	Erreur relative ⁽¹⁾ par rapport à l'autre essai (%)
Essai #1	2,495	4,88	11,22	2,94
Essai #2	2,504		10,90	-2,85
(1) $\frac{\text{valeur à comparer}-\text{valeur de référence}}{\text{valeur de référence}}$				

À partir des d_{mm} , des densités et des masses de chacun des constituants utilisés, les proportions réelles des EB confectionnés ont été calculées et sont présentées dans le Tableau 4.4. La Figure 4.1 illustre la variation du V_{ba} et de la quantité de bitume d'ajout (b %) en fonction du dosage en particules de verre. À l'exception de l'enrobé incorporant 20 % de particules de verre (ESG-14V-20), on remarque que le V_{ba} et le b % diminuent avec l'ajout de particules de verre. Les résultats pour l'enrobé ESG-14V-20 sont pour le moins étonnants. Ces résultats ont été confirmés à partir de deux mélanges distincts. Pour expliquer ces résultats particuliers, certaines hypothèses sont proposées.

Tableau 4.4 Résumé des valeurs de pourcentage de bitume d'ajout et densité maximale des EB étudiés

Dosage total massique (%)	Proportion de verre 0-0,315	Proportion de verre 0,630-2,5	b (%)	d _{mm}	d _{gb} combiné	V _{be} (%)	P _{ba} (%)	V _{ba} (%)
0	0	0	4,96	2,533	2,718	11,44	0,39	0,94
5	0	100	4,88	2,522	2,706	11,36	0,33	0,80
10	20	80	4,81	2,511	2,695	11,31	0,25	0,59
15	33	66	4,73	2,500	2,685	11,30	0,15	0,35
20	25	75	4,97	2,492	2,673	11,41	0,36	0,79
25	32	68	4,79	2,478	2,663	11,42	0,14	0,27

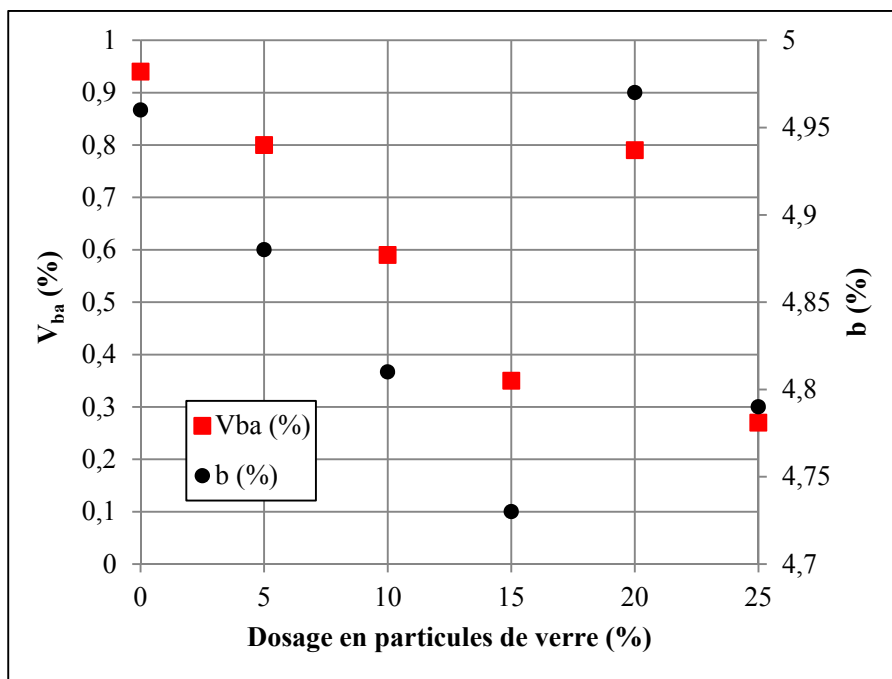


Figure 4.1 Évolution du V_{ba} (%) et du b (%) en fonction du dosage en particules de verre dans l'enrobé

Dans un premier temps, rappelons que la formulation des EB s'est faite en conservant la granularité du combiné. Or, les proportions de chacune des classes granulaires utilisées pour la confection des EB suivant différents dosages de particules de verre sont ainsi très différentes. Par conséquent, les propriétés propres à chacune des fractions granulaires (densité, abs) sont différentes, donnant lieu à une variation de celles du combiné. Ainsi, l'absorption du squelette granulaire du combiné est variable d'un enrobé à l'autre. À cet égard, l'évolution relative du volume de bitume absorbé (V_{ba}) estimé ainsi que celle du V_{ba} réel, toutes deux exprimées en référence aux valeurs de l'enrobé de référence (ESG-14R), sont tracées à la Figure 4.2 en fonction du dosage en verre. À noter que la valeur de V_{ba} estimé correspond à la moitié de l'absorption en eau calculée pour le combiné et que l'absorption est considérée comme indépendante de la grosseur du granulat. Les résultats montrent clairement le rôle de l'incorporation de verre au niveau de l'absorption du combiné. Les valeurs de V_{ba} estimé et V_{ba} réel diminuent de façon presque linéaire à l'exception du dosage de 20 % où l'on observe une singularité au niveau du V_{ba} réel. De plus, on remarque que le taux d'évolution de l'absorption est nettement plus marqué pour les valeurs réelles que les valeurs estimées ce qui laisse sous-entendre que d'autres phénomènes entrent en ligne de compte. En définitive, la Figure 4.2 montre clairement que du point de vue de l'absorption des particules, l'ajout de particules de verre a pour incidence de réduire le V_{ba} , expliquant ainsi en partie la réduction de la teneur en bitume d'ajout requis pour un V_{be} donné. Cependant, le calcul du V_{ba} estimé ne laisse pas entrevoir une quelconque variation atypique pour l'enrobé incorporant 20% de particules de verre.

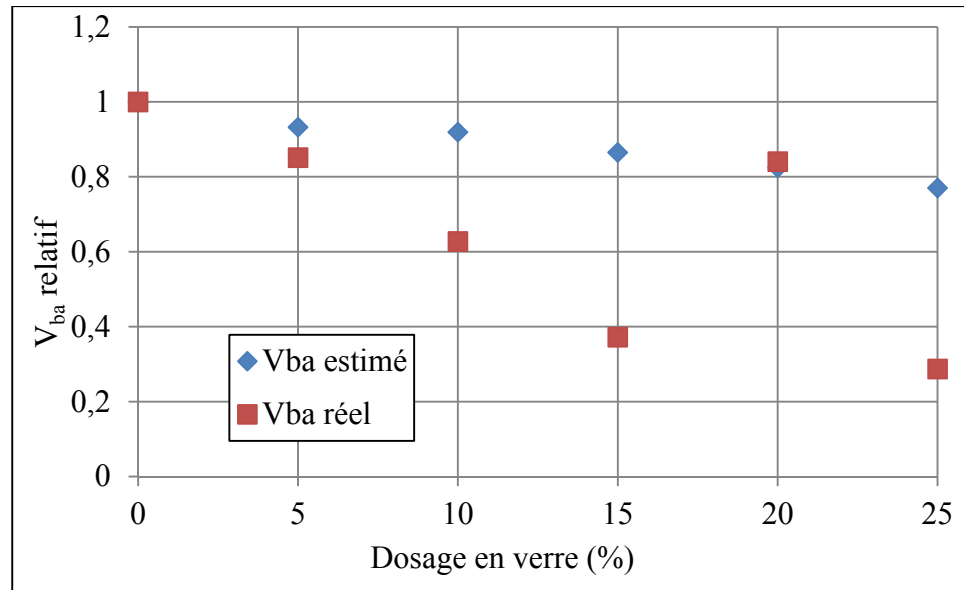


Figure 4.2 Évolution relative du V_{ba} estimé et du V_{ba} réel, exprimée en référence aux valeurs de l'enrobé de référence, en fonction du dosage en particules de verre dans l'enrobé

Un autre aspect pouvant expliquer la diminution du V_{ba} due à l'ajout de particules de verre dans l'enrobé est la différence au niveau de la surface spécifique (α) des combinés granulaires entre les différents EB étudiés. Pour mettre en lumière cet aspect, les surfaces spécifiques du squelette granulaire ont été calculées à partir de la granularité propre de chacun des enrobés tout en considérant que le diamètre moyen des particules retenues sur un tamis correspond à la racine carrée du produit des tamis supérieur et inférieur pour une masse retenue. Ces particules sont considérées comme étant parfaitement sphériques, ayant toutes le même diamètre et la même densité (Konrad et Gabezas, 2008). La surface spécifique de chacun des combinés des enrobés étudiés est présentée au Tableau 4.5 et les résultats sont reportés à la Figure 4.3. Les résultats montrent que l'utilisation de particules de verre diminue effectivement la surface spécifique du squelette granulaire par rapport à l'EB de référence. Le remplacement de particules fines minérales par des particules de verre plus grossières est responsable de cette diminution. En considérant que l'incorporation de particules de verre réduit la surface spécifique de l'ensemble du squelette granulaire, on a tout lieu de croire que cette diminution soit en partie responsable de la réduction de la demande en bitume d'ajout dans les enrobés bitumineux avec particules de verre.

Cependant, la Figure 4.3 montre clairement que l'effet des particules de verre est uniforme et progressif et qu'aucune singularité n'est observée pour le squelette granulaire de l'enrobé ESG-14V-20 au dosage de 20 % ne peut être expliqué par la variation de la surface spécifique, car cet EB présente la valeur de surface spécifique la plus faible de tous les EB.

Tableau 4.5 Surface spécifique des différents EB étudiés

Dosage en verre (%)	Surface spécifique α (m ² /kg)
0	12,54
5	10,96
10	10,68
15	9,72
20	7,99
25	9,14

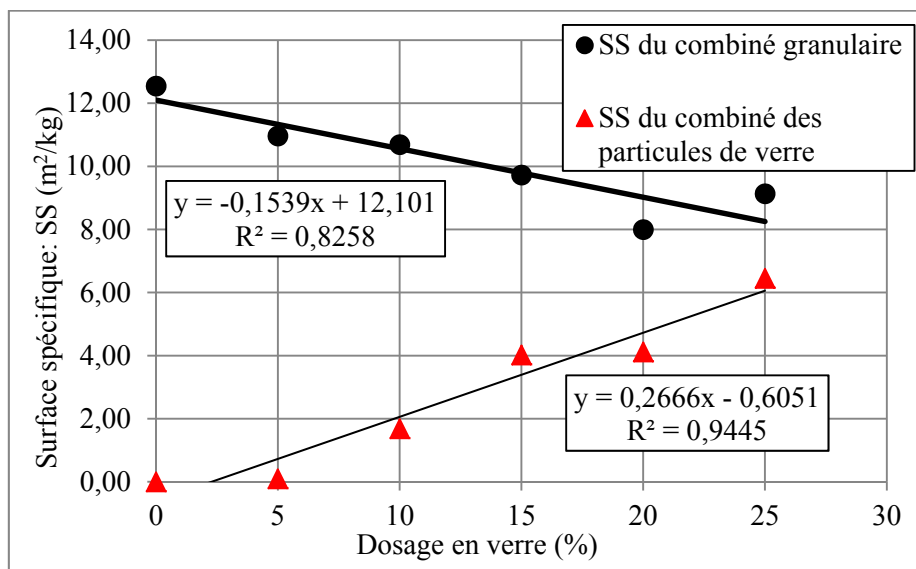


Figure 4.3 Évolution de la surface spécifique du squelette granulaire et du granulat de verre (combiné des particules de verre A et D) en fonction du dosage en particules de verre pour les EB étudiés

Toujours dans la perspective d'expliquer le comportement divergeant des résultats de l'enrobé ESG-14V-20, un dernier aspect pourrait contribuer à expliquer la diminution du V_{ba} observée pour cet enrobé. Il est possible que pour cette combinaison de particules il puisse y avoir la formation de « grappes » au sein des particules de verre. Les forces de surface de nature électrostatique peuvent dans certains cas engendrer la formation de « grappe de particules » constituant ainsi des amas de particules agglomérées formant ainsi une « pseudo-particule grossière » et dont la porosité apparente s'avère inévitablement plus élevée que celle des particules constitutives. En admettant que le bitume ne pénètre pas dans ces pores, cette « porosité » peut être considérée comme un vide imperméable, tel que défini à la section 1.3.1.1. Pour un EB, cela fait en sorte qu'une partie des particules au sein de ces grappes ne sont pas enrobées de bitume. Dans le cas où cette hypothèse s'avère juste, l'enrobage des particules de verre au sein de l'enrobé ESG-14V-20 serait donc imparfait. Il est possible que la formation de « pseudo-particule » varie suivant les différents dosages en verre et les proportions relatives des deux fractions de particules de verre. Cela expliquerait en partie pourquoi certains dosages en verre présentent une diminution de la teneur en bitume d'ajout par rapport à l'EB de référence. Dans la perspective que ce phénomène soit réel, cela signifie que la méthode d'essai utilisé pour déterminer le V_{be} , soit à partir de la densité maximale, est erronée et ne permet pas de déterminer de façon juste et précise les caractéristiques volumétriques respectives à chacun des constituants. Cette hypothèse n'a pu être vérifiée dans le cadre de cette recherche. Il est actuellement, impossible pour l'instant d'expliquer avec certitude le phénomène de diminution du V_{ba} et la singularité observée au dosage de 20 %.

4.2.2 Évaluation de l'aptitude au compactage à la presse à cisaillement giratoire

À partir des enrobés formulés en regard au V_{be} ciblé, des essais en vue d'évaluer leur aptitude au compactage ont été réalisés à la presse à cisaillement giratoire. Notons que l'enrobé ESG-14V-5 a été mis de côté, car il ne représentait pas un bon potentiel de recyclage par rapport à la quantité de verre utilisé.

Les résultats des essais de PCG sont présentés dans le Tableau 4.6. À moins d'indication contraire, les résultats présentés sont la moyenne de trois essais réalisés pour chacun des enrobés confectionnés.

Tableau 4.6 Résumé des résultats de l'essai de l'aptitude au compactage

EB	Pourcentage de vides (%)			Conformité
	10	100	200	
Nombre de girations	10	100	200	
ESG-14R	15,6	5,6	3,2	Oui
ESG-14V-10	14,5	6,2	4,2	Oui
ESG-14V-15 ⁽¹⁾	11,6	3,6	1,8	Non
ESG-14V-20	12,5	5,4	3,8	Oui
ESG-14V-25	9,7	2,5	1,1	Non

⁽¹⁾ moyenne de deux essais

Pour illustrer la variation du pourcentage des vides en fonction du nombre de girations, les résultats ont été tracés à la Figure 4.4. De plus, la Figure 4.5 présente les résultats où la variation de l'indice des vides est représentée en fonction du dosage en verre. Dans les deux cas, les zones ombragées illustrent les exigences à 10 et 100 girations, tandis que la ligne rouge représente l'indice des vides minimal après 200 girations.

Dans un premier temps, on remarque qu'à 10 girations, tous les EB possèdent un indice des vides inférieur à celui de l'EB de référence. Puisque le critère à 10 girations est associé à l'indice des vides de l'enrobé à la sortie du finisseur (section 1.4.3.1), les résultats portent à croire que l'ajout de particules de verre facilite la mise en place et améliore ainsi l'ouvrabilité de l'EB.

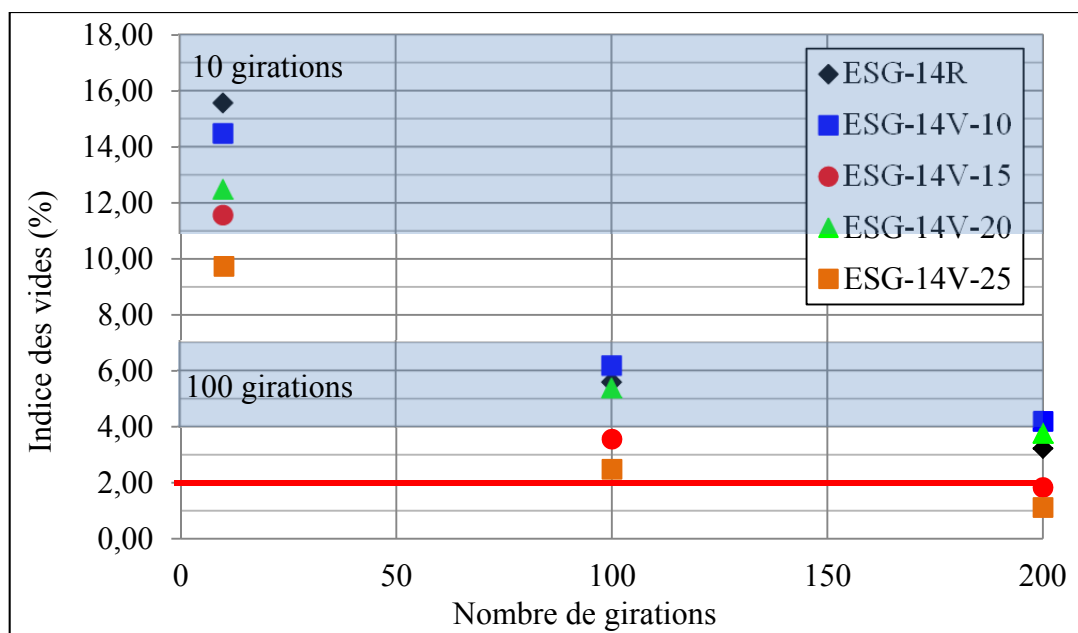


Figure 4.4 Indice des vides (%) en fonction du nombre de girations à l'essai de PCG

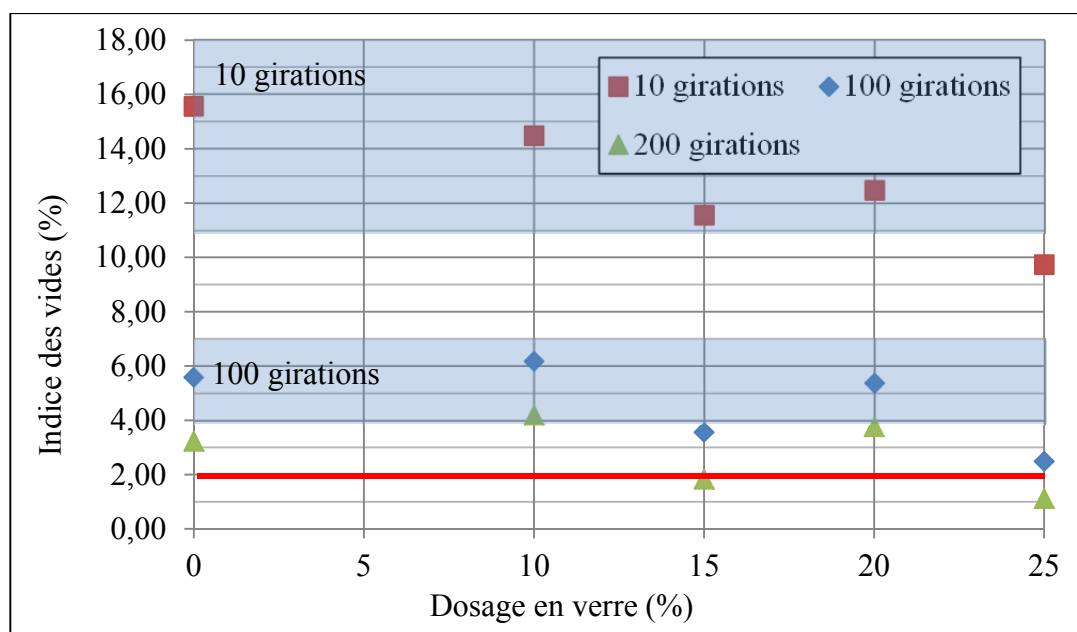


Figure 4.5 Indice des vides (%) en fonction des différents dosages en verre à l'essai de PCG

Pour ce qui est des critères à 100 et 200 girations, l'ajout de particules de verre selon certains dosages ne semble pas avoir d'impact significatif sur l'indice des vides. En effet, les différences entre les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-20 par rapport à ESG-14R sont très faibles. Par contre, pour les enrobés ESG-14V-15 et ESG-14V-25, on remarque une plus grande différence par rapport à l'EB de référence. Pour comprendre en partie ce phénomène, les taux de variation de l'indice des vides pour chacun des EB étudiés en fonction du nombre de girations ont été estimés avec une droite de régression linéaire et reportée à la Figure 4.6 selon les fourchettes suivantes : 1 à 10 girations, 10 à 100 girations et 100 à 200 girations. Les résultats sont présentés à la Figure 4.7.

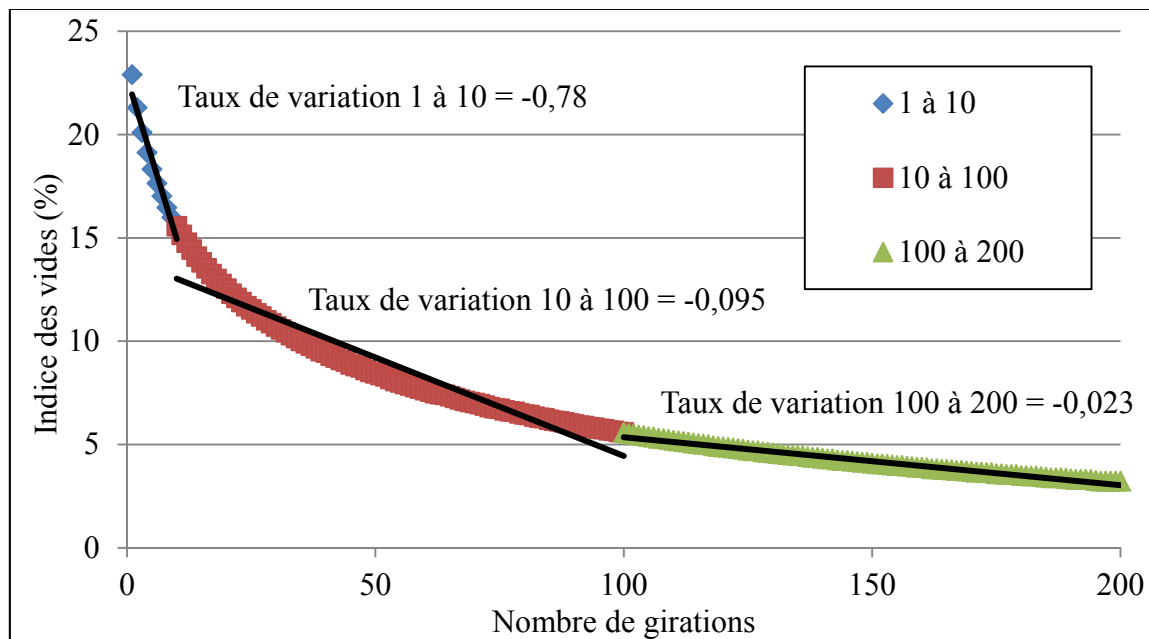


Figure 4.6 Exemple du calcul du taux de variation de l'indice des vides pour l'EB de référence

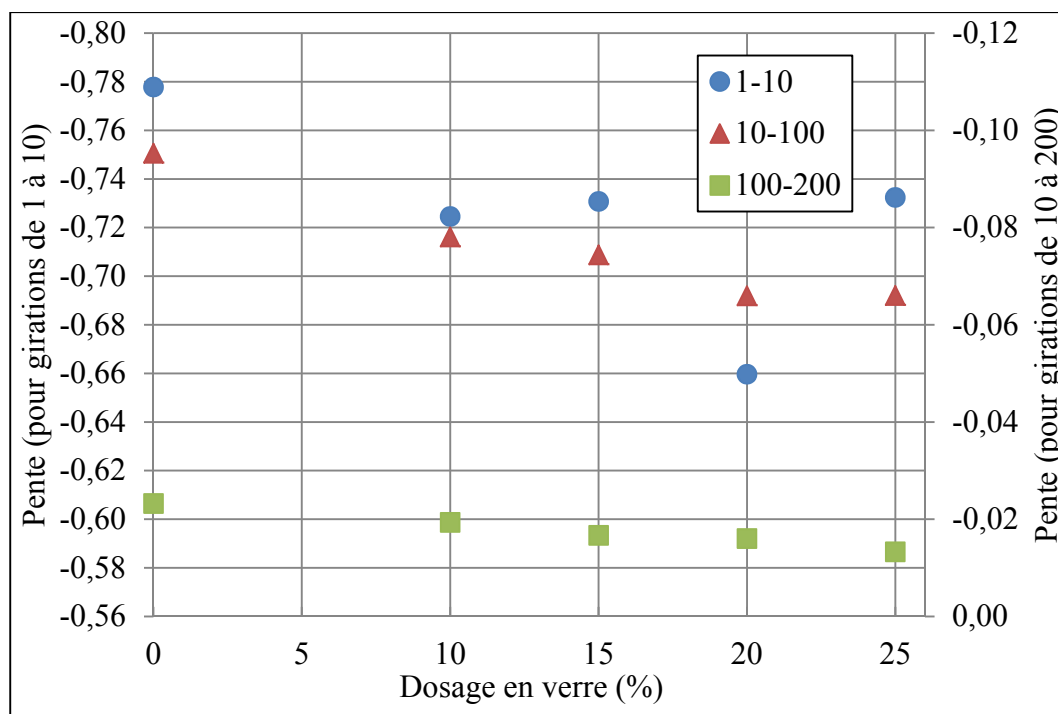


Figure 4.7 Taux de variation des variations de l'indice des vides pour les EB en fonction du dosage en verre

Dans un premier temps, on remarque que les taux de variation de l'indice des vides dans les toutes premières girations (pente de 1 à 10 girations) pour les EB incorporant des particules de verre sont inférieurs au taux de variation de l'EB de référence. Cela signifie que durant les 10 premières girations, la variation de l'indice des vides des EB incorporant des particules de verre est moins importante que celle de l'EB de référence. Par la suite, pour les pentes de 10 à 100 girations et de 100 à 200 girations, on remarque une tendance similaire, soit des taux de variation plus faibles pour les EB avec verre que l'EB de référence, mais de façon moins marquée que pour les girations 1 à 10. Au final, les taux de variation de l'indice des vides pour les EB avec verre sont tous inférieurs aux taux de variation de l'EB de référence. Cela laisse sous-entendre que l'utilisation de verre pourrait diminuer la malléabilité de l'EB. Or, on remarque que les valeurs d'indice des vides à 10 girations pour tous les EB avec verre (Tableau 4.6) sont inférieures à celle de l'EB de référence ce qui semble être en contradiction avec les valeurs des taux de variation de l'indice des vides. Une des raisons qui pourrait expliquer ce comportement concerne l'indice des vides de l'éprouvette d'EB avant le début de l'essai, soit à 0 giration.

Rappelons que lors de l'essai avec la presse à cisaillement giratoire, les cycles de girations débutent après que la charge de 600 kPa soit appliquée sur l'éprouvette. Les valeurs d'indices des vides des EB testés mesurés à 0 giration sont présentées dans le Tableau 4.7. Les résultats montrent qu'à 0 giration, l'indice des vides pour les EB avec verre sont inférieur à l'EB de référence. Cela veut dire que les EB avec verre se compactent plus facilement que l'EB de référence lors de l'application de la charge en début d'essai.

Tableau 4.7 Indices des vides à 0 giration pour tous les EB testés

Dosage en verre (%)	Indice des vides à 0 giration (%)
0	25,7
10	24,1
15	21,4
20	21,5
25	19,6

La teneur en particules passant au tamis 0,080 mm pourrait être la cause de la différence d'indice des vides à 100 et 200 girations. La Figure 4.8 illustre les variations des indices des vides à 100 et 200 girations ainsi que la variation de la teneur en particules passant au tamis 0,080 mm des différents EB avec verre par rapport à l'EB de référence. Les résultats présentés à la Figure 4.8 montrent que la teneur en particules passant au tamis 0,080 mm pour les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-20 est très similaire à celle de l'enrobé de référence. Par contre, pour les enrobés ESG-14V-15 et ESG-14V-25, une augmentation de la teneur en particules passant au tamis 0,080 mm par rapport à celle de l'EB de référence est notée et, par le fait même, une diminution de l'indice des vides à 100 et 200 girations. On peut conclure qu'au niveau de l'indice des vides à 100 et 200 girations, le facteur responsable des différences au niveau de l'indice des vides entre certains des EB avec verre et l'EB de référence est la proportion de particules passant au tamis 0,080mm.

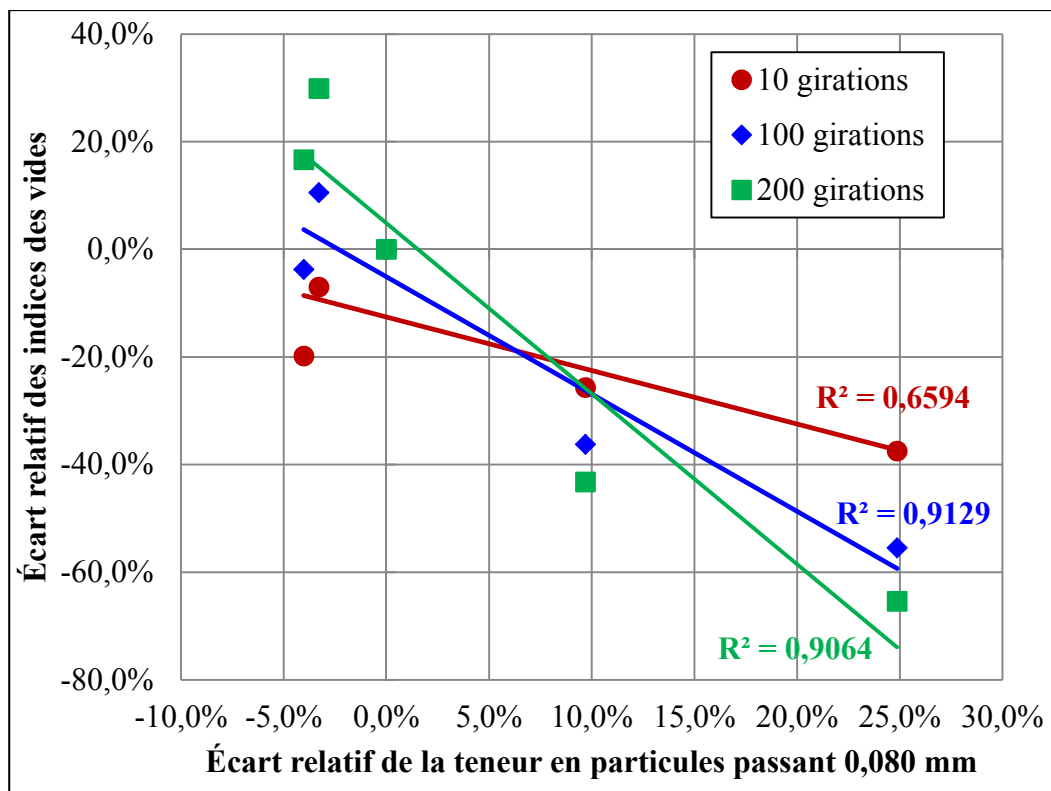


Figure 4.8 Écart relative des indices des vides ainsi que de la teneur en particules passant au tamis 0,080 mm par rapport à l'EB de référence

Au final, les résultats obtenus montrent que seuls les enrobés ESG-14V-10 et l'ESG-14V-20 respectent toutes les exigences de la norme LC 4202 pour l'enrobé ESG-14.

4.2.3 Résistance à l'orniérage

Comme il a été relevé lors de la revue de littérature, l'utilisation de particules de verre dans un EB diminue la résistance à l'orniérage. Pour sélectionner le dosage optimal en particules de verre, il convient donc d'emblée de vérifier la performance à l'orniérage des deux EB répondant aux exigences relatives au V_{be} ainsi qu'à la PCG, soit les EB ESG-14V-10 et ESG-14V-20.

Pour les essais de résistance à l'orniérage, la teneur en vides des plaques est une donnée importante qui peut avoir un impact significatif sur les résultats. Les résultats des essais de résistance à l'orniérage sont présentés au Tableau 4.8 et à la Figure 4.9. À noter qu'une seule plaque pour l'EB ESG-14V-10 a été testée pour cause d'erreur de manipulation.

Tableau 4.8 Résultats des essais de résistance à l'orniérage

Type d'EB	# de plaque	b (%)	V _{be} (%)	Indice des vides (Vi %)	Nombre de cycles			
					1,000	3,000	10,000	30,000
ESG-14R	1	4,96	11,44	5,2	4,6	5,4	6,5	7,0
	2			4,9	4,1	4,9	5,8	6,9
	Moy.			5,0	4,4	5,2	6,2	7,0
ESG-14V-10	1	4,81	11,31	5,4	3,6	5,4	11,0	¹
ESG-14V-20	1	4,97	11,38	5,6	6,3	8,6	13,8	¹
	2			5,6	5,3	6,7	10,2	¹
	Moy.			5,6	5,8	7,7	12,0	S.O.

¹ L'essai a été arrêté avant 30,000 cycles, car l'éprouvette avait déjà dépassé les exigences

La ligne rouge à la Figure 4.8 illustre le pourcentage maximal d'orniérage permis après 30,000 cycles suivant la norme LC 4202. À l'exception de l'enrobé ESG-14V-10, chaque courbe représente la moyenne des résultats de deux éprouvettes testées. Les résultats montrent clairement que l'ajout de particules de verre réduit de façon importante la résistance à l'orniérage de l'enrobé ESG-14. Les essais pour les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-20 ont été arrêtés après seulement 10,000 cycles étant donné que les profondeurs moyennes d'ornières dépassaient déjà les exigences de la norme 4202 pour l'enrobé ESG-14. À noter qu'aucun des EB testés n'a présenté de ressuage après l'essai.

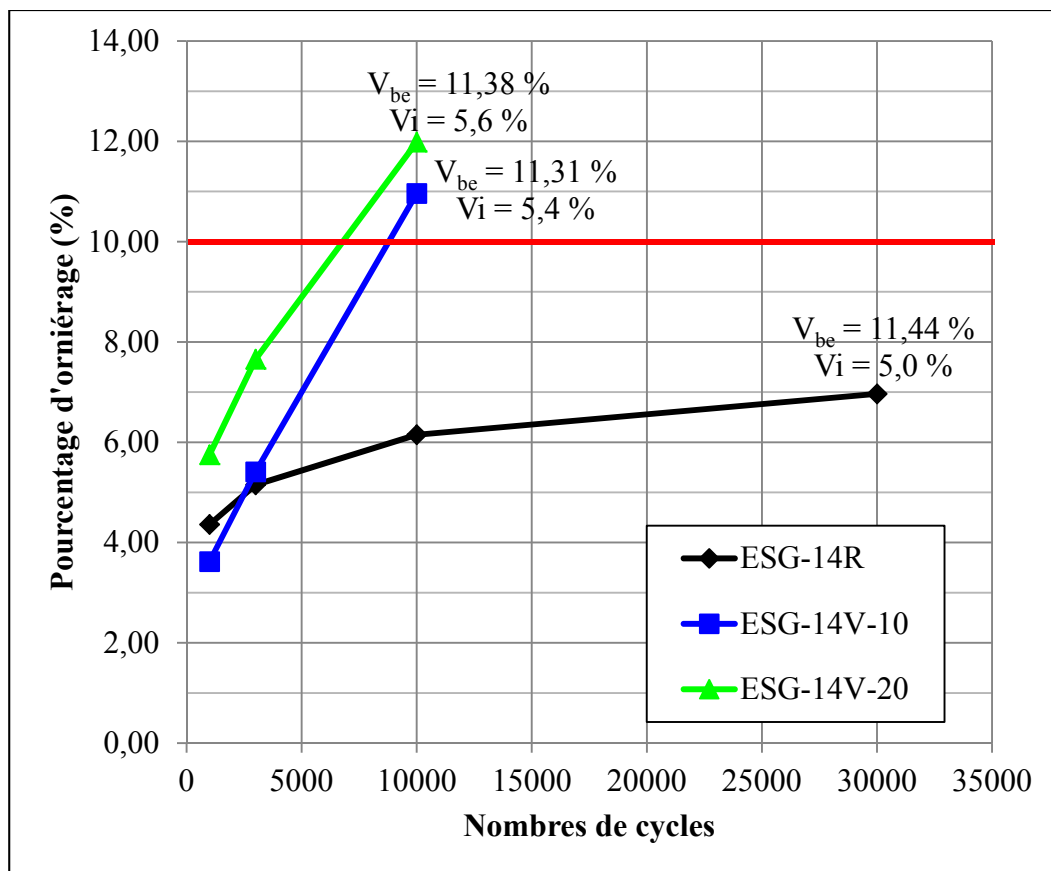


Figure 4.9 Résultats des essais de résistance à l'ornièrage

Afin de comprendre ce phénomène, quelques éléments ont été analysés. Dans un premier temps, les VAM ont été calculés pour chacune des plaques afin de vérifier si une quelconque variation permettrait d'expliquer les résultats obtenus. Le Tableau 4.9 présente les valeurs de VAM et de VCB pour les EB testés.

Tableau 4.9 Vide intergranulaire et vide comblé par le bitume des mélanges testés à l'essai de résistance à l'ornièrage

EB	VAM (%)	VCB (%)
ESG-14R	16,5	69,5
ESG-14V-10	16,8	67,5
ESG-14V-20	17,0	67,1

Comme le montrent les résultats du Tableau 4.8, la différence de résistance à l'orniérage entre les EB confectionnés avec des particules de verre et l'EB de référence ne peut être attribuée à une variation de VAM.

Dans un deuxième temps, une analyse des différents types d'orniérage des EB peut fournir des pistes de réflexion pour tenter d'expliquer les résultats obtenus. Comme il a été mentionné à la section 1.5.2, l'orniérage d'un EB peut être décomposé en deux types, soit l'orniérage de consolidation suivi de l'orniérage de fluage. Afin d'expliquer les résultats obtenus, il convient de définir la notion de « compacité maximale ». La compacité maximale d'un EB correspond à la valeur maximale de compacité qu'il est possible d'obtenir pour un EB donné et qui dépend, entre autres, de son squelette granulaire. Lors d'un essai de résistance à l'orniérage, si la compacité de l'éprouvette se situe en dessous de cette valeur maximale, on observe de l'orniérage de consolidation, tandis que si cette dernière se situe en dessus de cette valeur maximale, l'orniérage est alors associé au phénomène de fluage. Par ailleurs, il est couramment admis que la résistance à l'orniérage est optimale pour une compacité située entre 93 et 96%, suivant le type d'enrobé. Lors du compactage d'une plaque destinée à l'essai à l'orniéreur, celle-ci est compactée en ciblant une compacité de 95 %.

Dans le cadre de ce projet, toutes les plaques d'EB testé se retrouvent près de la valeur cible de 95 % de compaction, soit pour un indice des vides de 5 % (Tableau 4.8). Or, il est possible que la compacité maximale des EB confectionnés avec des particules de verre soit différente de celle de l'EB de référence. Pour tenter de mettre en relief les différences au niveau de la compacité maximale des EB testés, on peut estimer la valeur de la compacité maximale en se référant à la compacité obtenue après 200 girations à la PCG. Pour appuyer cette affirmation, on peut regarder les taux de variation de l'indice des vides à la PCG entre la 100e et la 200e giration présentées à la Figure 4.7. À cet effet, les taux de variation de l'indice des vides des trois EB testés à l'essai d'orniérage sont très près d'une valeur nulle ce qui laisse présager qu'à 200 girations, la compacité atteinte est très voisine de la compacité maximale de l'EB. La Figure 4.10 illustre pour les enrobés testés à l'orniérage la compacité à la PCG après 10, 100 et 200 girations ainsi que la compacité des plaques des EB testés à l'orniéreur.

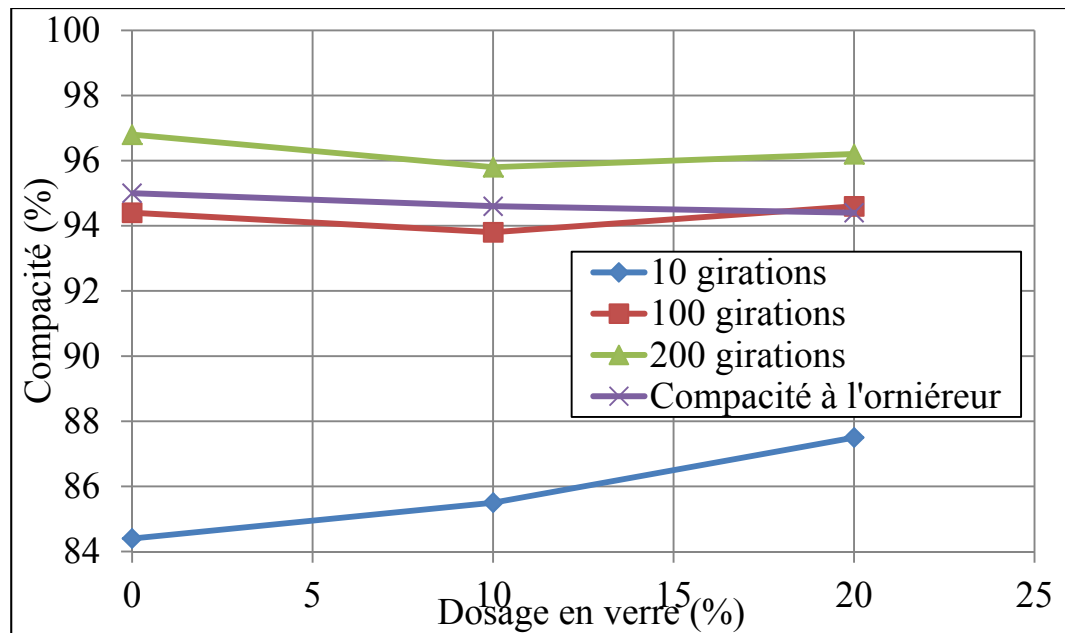
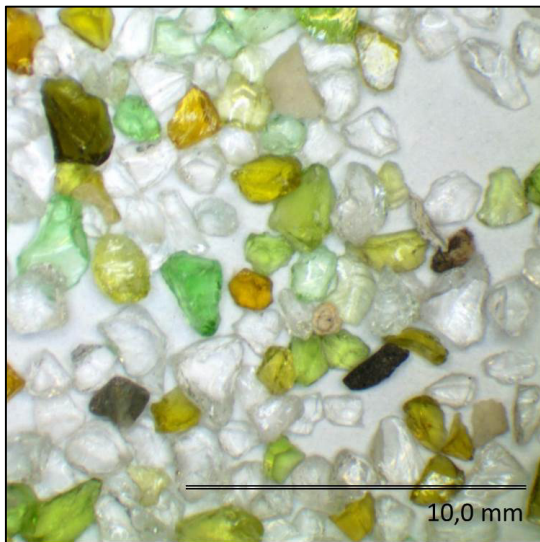


Figure 4.10 Compacité des EB à 10, 100 et 200 girations ainsi que des plaques testées à l'essai d'ornièreur

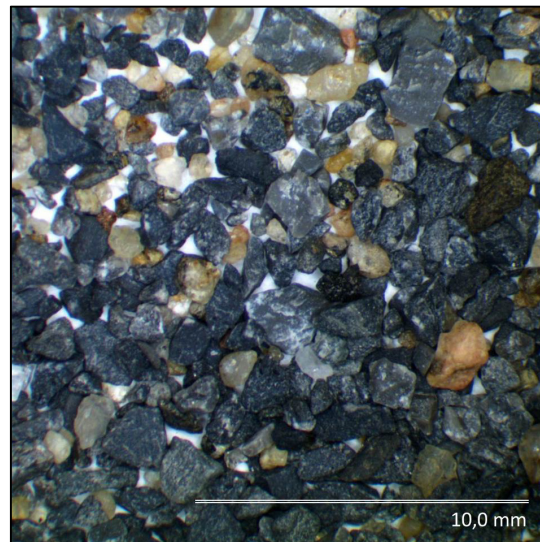
Les résultats de la Figure 4.9 montrent que dans tous les cas, la compacité des plaques à l'ornièreur est inférieure à la valeur de la compacité correspond à celle obtenue après 200 girations à la PCG. Les EB incorporant des particules de verre présentent des valeurs de compacité maximale estimées à 95,8 % (10 % de verre) et à 96,2 % (20 % de verre), lesquelles sont inférieures à celle estimée pour l'EB de référence, de l'ordre de 96,8 %. Comme il a été mentionné à la section 1.5.2, en cours d'essai à l'ornièrage, il y a une transition de l'ornièrage de consolidation vers l'ornièrage de fluage dû à une densification de l'EB. Étant donné que les compacités maximales estimées des EB incorporant des particules de verre sont inférieures à celle de l'EB de référence, cela voudrait dire que lors d'un essai de résistance à l'ornièrage, l'ornièrage de fluage est atteint plus rapidement pour ces EB. Si l'on regarde la Figure 1.15, on remarque que le taux d'évolution de l'ornièrage de fluage est plus important que l'ornièrage de consolidation. Cela pourrait expliquer pourquoi les EB avec verre présentent des résistances à l'ornièrage inférieures à celle de l'EB de référence. Il est possible que pour les EB avec verre, on se situe plus près de la transition entre les deux types d'ornièrage comparativement à l'EB de référence étant donné la différence de taux de compaction maximal. Cela pourrait expliquer en partie pourquoi les EB avec verre sont plus

susceptibles à l'orniérage. Étant donné que la compacité des plaques n'a pas été relevée suite aux essais d'orniérage, il n'est pas possible de valider cette hypothèse.

Finalement, un autre aspect qui pourrait expliquer les résultats obtenus et qui semble très plausible concerne la qualité des points de contact de la matrice granulaire. Il est possible que les points de contact créés par les particules de verre soient de moins bonnes qualités comparativement à ceux issus des granulats conventionnels. Bien que la forme des particules de verre semble relativement anguleuse (Figure 4.11), la texture des particules de verre semble plus lisse que celle des granulats conventionnels comme il a été relevé dans la revue de la littérature. Une texture lisse se traduit par une réduction des forces de friction entre les particules de la matrice granulaire. Ces éléments n'ont pas été étudiés dans le cadre de ce projet.



a) Verre 0,630-2,5 mm



b) Pierre calcaire 0,630-2,5 mm

Figure 4.11 Photos prise au microscope des particules de verre et de la pierre calcaire

4.3 Phase II - sélection du dosage optimal en particules de verre post-consommation

Suite à la réalisation des essais de la phase I, il a été constaté que la méthode utilisée dans cette recherche pour incorporer des particules de verre dans les EB, soit en substituant une

partie des granulats par des particules de verre tout en conservant la granularité et le V_{be} , ne permet pas d'obtenir un enrobé ESG-14 avec particules de verre qui soit conforme aux exigences quant à la résistance à l'orniérage. Après réflexion, il a été convenu de mettre l'accent sur le critère de performance à l'orniérage en vue de sélectionner le dosage optimal en particules de verre. Dans ce contexte, puisqu'il est bien connu que la réduction de la teneur en bitume pour un EB donné améliore la résistance à l'orniérage, il a été choisi de réduire la teneur en bitume de l'enrobé incorporant des particules de verre. Pour ce faire, la teneur en bitume optimale a été cernée pour un dosage en particules de verre fixé à 10 %. La teneur en bitume d'ajout pour cet EB a été réduite d'environ 6 %, ce qui correspond à une valeur de 4,53 % pour un V_{be} de 10,66 %. L'enrobé confectionné est désigné ci-après ESG-14V-10-B.

En vue d'évaluer l'aptitude au compactage de l'enrobé ESG-14V-10-B, les valeurs moyennes des trois essais réalisés sont présentées dans le Tableau 4.10 où l'on retrouve aussi les valeurs moyennes pour l'ESG-14V-10. Les résultats montrent que la réduction de la teneur en bitume a pour effet d'augmenter l'indice des vides et ce, peu importe le nombre de girations. On observe ce comportement, car le bitume à haute température agit comme lubrifiant et favorise les mouvements entre les particules (Di Benedetto et Corté, 2005). Les résultats de la Figure 4.12 montrent que l'enrobé ESG-14V-10-B ne respecte pas toutefois l'exigence d'indice des vides (entre 4 et 7 %) à 100 girations. l'enrobé ESG-14V-10-B a tout de même été testé à l'orniérage. Le Tableau 4.11 et la Figure 4.13 présentent les résultats de résistance à l'orniérage pour les enrobés ESG-14V-10-B et ESG-14V-10. Comme le montrent les résultats, la réduction de la teneur en bitume a un impact significatif sur la résistance à l'orniérage de ces enrobés bitumineux incorporant des particules de verre. Au final, l'enrobé ESG-14V-10-B a été sélectionné pour la suite du projet en vue de déterminer les performances thermomécaniques et de durabilité des enrobés incorporant des particules de verre.

Tableau 4.10 Résultats d'essais à la PCG des deux EB avec 10 % de verre

EB	Pourcentage de vides (%)		
Nombre de girations	10	100	200
ESG-14V-10	14,5	6,2	4,2
ESG-14V-10-B	15,2	7,3	5,6

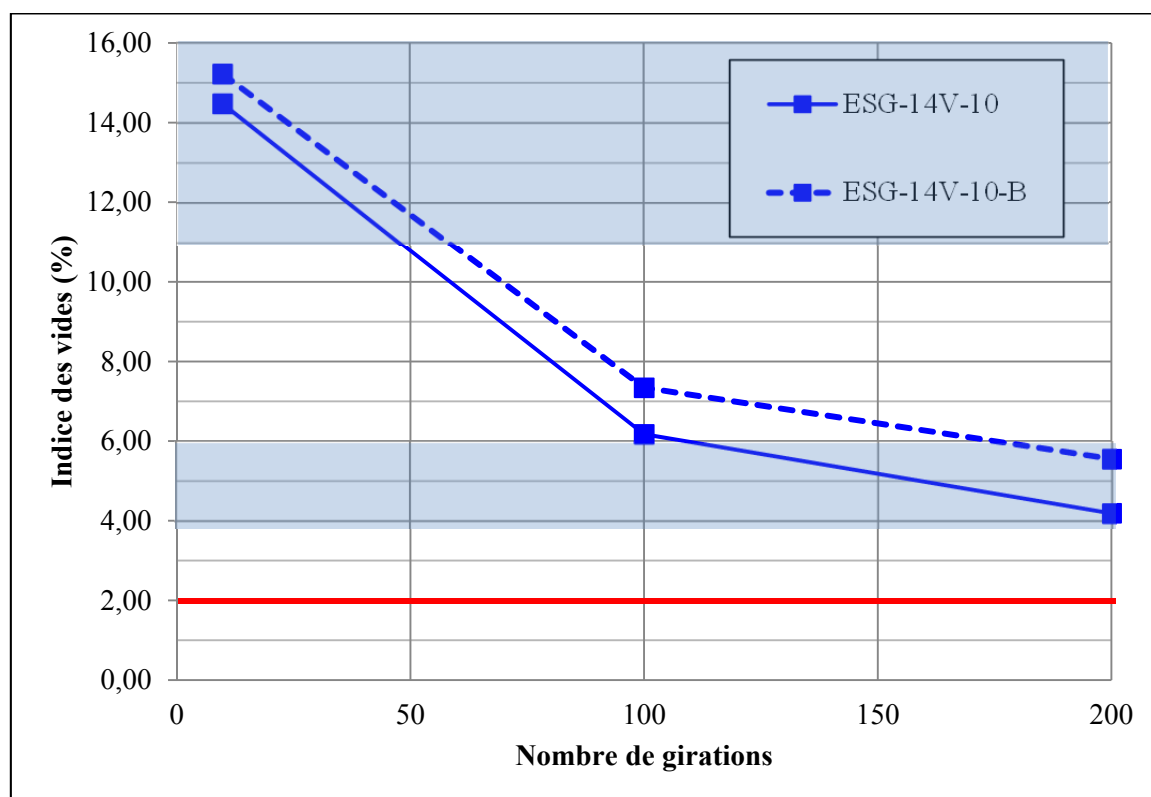


Figure 4.12 Indice des vides à l'essai PCG pour les deux EB avec 10 % de verre

Tableau 4.11 Résultats des essais de résistance à l'orniérage pour les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-10-B

Type d'EB	# de plaque	b (%)	V _{be} (%)	Indice des vides (V _i %)	Nombre de cycles			
					1,000	3,000	10,000	30,000
ESG-14V-10	1	4,81	11,31	5,4	3,6	5,4	11,0	⁽¹⁾
ESG-14V-10-B	1	4,53	10,66	4,6	2,5	3,3	4,5	6,4

⁽¹⁾ L'essai a été arrêté avant 30,000 cycles, car l'éprouvette avait déjà dépassé les exigences

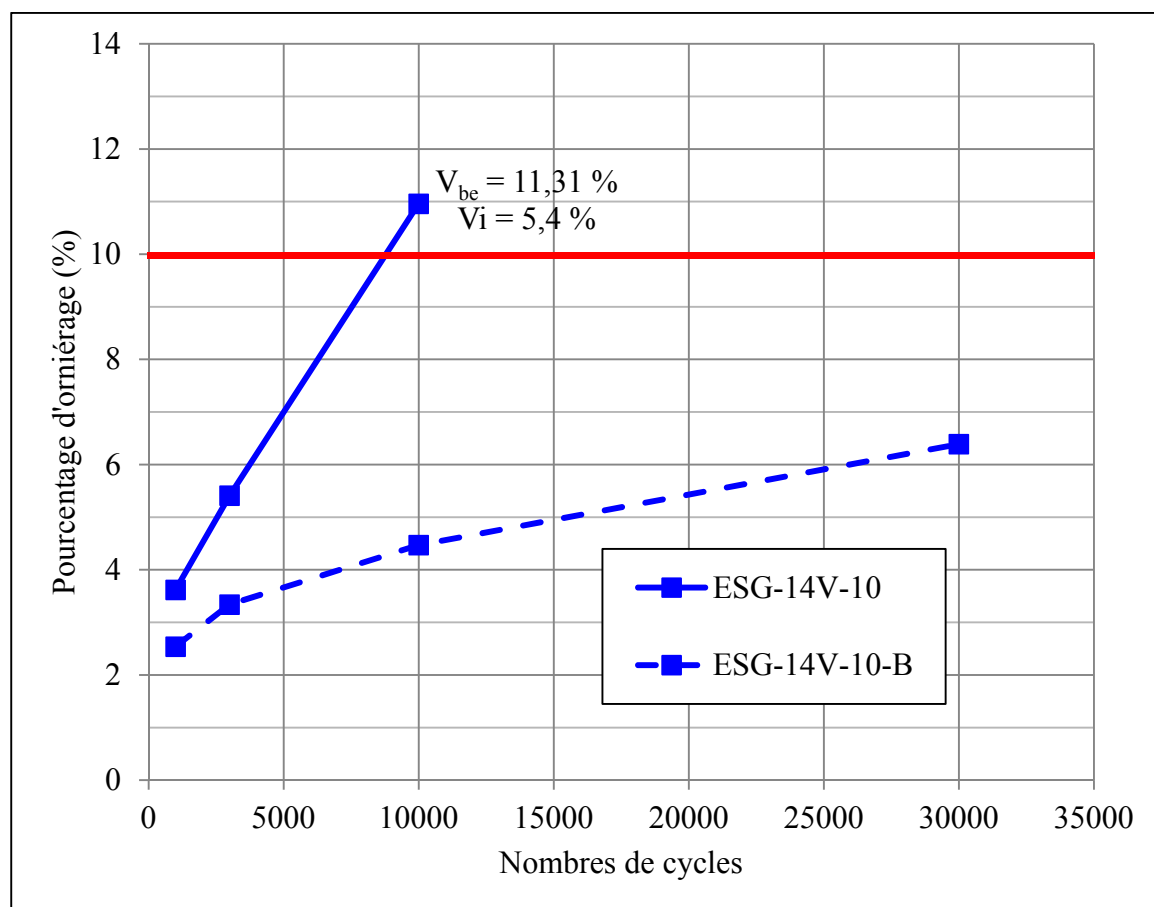


Figure 4.13 Résultats des essais de résistance à l'orniérage pour les enrobés ESG-14V-10 et ESG-14V-10-B

4.4 Phase III - évaluation des performances

La section suivante présente les résultats des essais de résistance au retrait thermique empêché, de détermination du module complexe, de résistance à la fissuration par fatigue, de caractéristiques physiques et de durabilité. Ces essais ont été réalisés sur les enrobés ESG-14R et ESG-14V-10-B.

4.4.1 Essai de résistance au retrait thermique empêché

Dans le cadre de ce projet, trois essais de résistance au retrait thermique empêchés (TSRST) ont été réalisés pour chacun des EB testés ce qui correspond au nombre minimum pour obtenir des résultats représentatifs selon la norme AASHTO TP10-93. Le Tableau 4.12 compile les informations relatives aux essais de TSRST. La Figure 4.14 et la Figure 4.15 présentent les résultats des trois éprouvettes testées pour les EB testés.

Lors de l'analyse des résultats, il est important de prendre en considération la température basse (T_b) du bitume. Le bitume utilisé est de type PG 64-34P et la température basse est établie à $-36,6^{\circ}\text{C}$ selon l'attestation de conformité fournie par le fabricant. On peut remarquer que les valeurs moyennes de température de rupture pour les deux EB sont très similaires et très près de la température basse du bitume. Par contre, on observe une légère différence entre les deux EB au niveau de la valeur moyenne de contrainte de rupture. La valeur moyenne est de 3,6 MPa pour l'EB de référence tandis qu'elle est de 3,0 MPa pour l'enrobé ESG-14V-10-B. Cette différence de résultat peut s'expliquer en partie à la différence quant à la teneur en vides dans les éprouvettes testées ou bien à une différence au niveau de la teneur en bitume réelle. Même si la différence entre les deux EB au niveau de la contrainte semble faible, cela représente un écart relatif de 20 %, ce qui est significatif. Une analyse plus approfondie des résultats est présentée à la section 5.1.

Tableau 4.12 Résultats des essais de résistance au retrait thermique empêché

Enrobé	b (%)	# d'échantillon	Vi (%)	Rupture		T° de transition vitreuse (°C)	T° de transition bissectrice (°C)	Pente #1 (MPa/°C)	Pente #2 (MPa/°C)
				Contrainte (MPa)	T° surface (°C)				
ESG-14R	4,96	P2A1X	3,95	3,5	-33,4	-28,93	-19,76	-0,015	-0,224
		P2A2X	5,10	4,8	-33,5	-27,73	-18,62	-0,012	-0,194
		P2A3X	4,68	3,4	-35,5	-30,86	-19,05	-0,010	-0,203
		Moy.	4,57	3,6	-34,1	-29,17	-19,14	-0,012	-0,207
ESG-14V-10-B	4,53	P2A1X	6,16	2,4	-31,6	-26,05	-17,52	-0,010	-0,153
		P2A2X	5,51	3,2	-35,3	-29,33	-19,63	-0,012	-0,182
		P2A3X	5,34	3,4	-35,5	-29,75	-19,97	-0,012	-0,201
		Moy.	5,67	3,0	-34,1	-28,34	-19,04	-0,011	-0,179

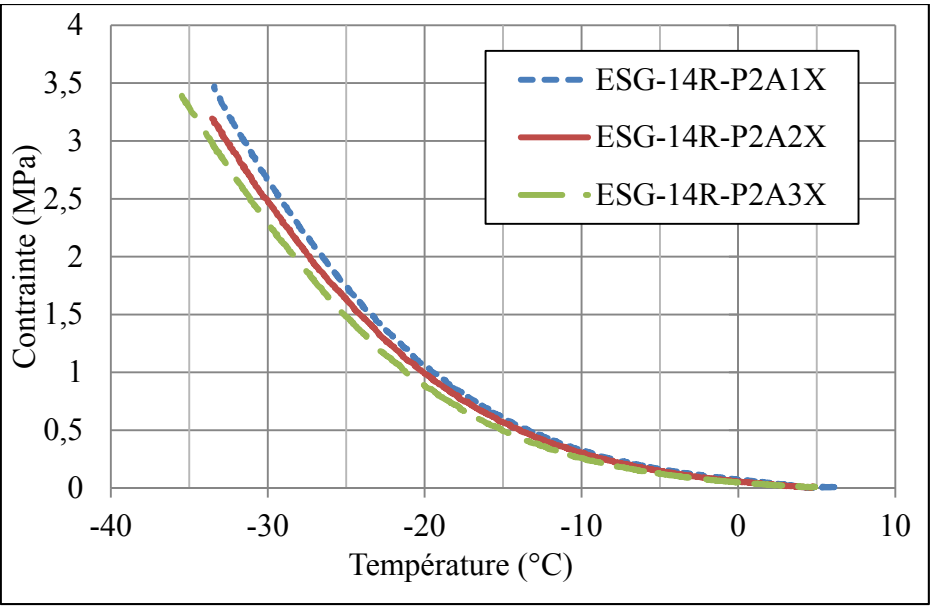


Figure 4.14 Évolution de la contrainte en fonction de la température pour l'ESG-14R (Taux de refroidissement de 10°C/h)

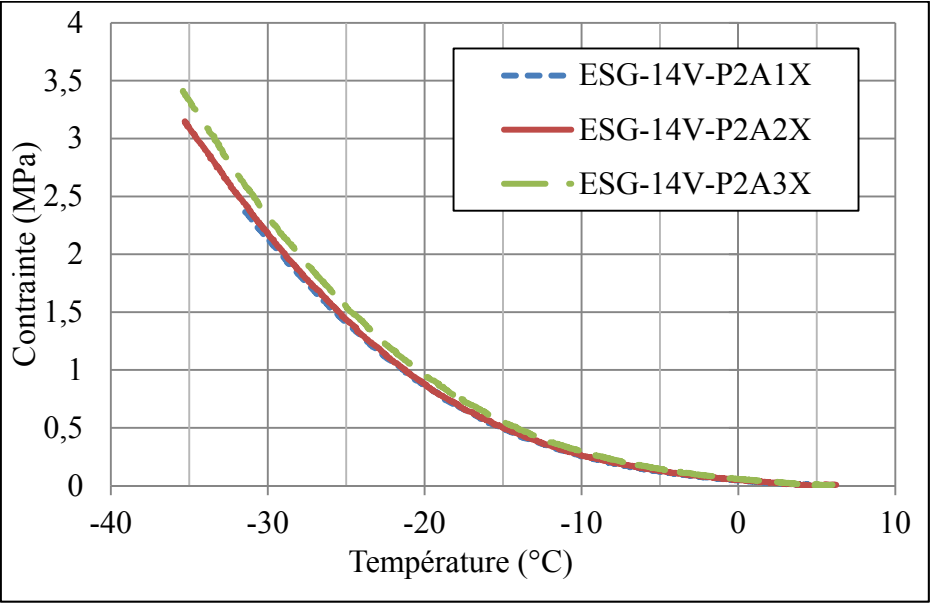


Figure 4.15 Évolution de la contrainte en fonction de la température pour l'ESG-14V-10-B (Taux de refroidissement de 10°C/h)

4.4.2 Essai de détermination du module complexe

Dans le cadre de ce projet, deux essais de module complexe ont été réalisés pour chacun des EB. Le Tableau 4.13 présente les caractéristiques des éprouvettes utilisées pour la mesure du module complexe. Dans un premier temps, afin de faciliter la compréhension et l'analyse des résultats, les résultats d'un seul essai de module complexe seront présentés et discutés soit, l'éprouvette ESG-14R-P2B3X. De plus, une analyse comparative des résultats d'essais de module complexe entre l'EB de référence et l'enrobé ESG-14V-10-B est présentée à la section 5.2.

Lors de la réalisation d'un essai de détermination du module complexe, il est impératif de vérifier la qualité des résultats obtenus selon deux critères : 1) indice de qualité (IQ%), 2) écart de l'amplitude de déformation d'un extensomètre ($\Delta \varepsilon_{\text{ext}}$). Les indices de qualités permettent de quantifier l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées et sont calculés à partir de l'équation (4.1). Il s'agit d'un indicateur de fiabilité de l'essai qui, dans le cas d'un essai parfait, est égal à zéro. Dans le cadre de ce projet, le calcul des indices de qualités s'est fait avec un fichier Excel développé au LCMB par rapport au signal de la déformation, de la contrainte et des trois extensomètres utilisés. Pour qu'un résultat soit jugé acceptable, l'indice de qualité doit être inférieur à 15 %. Dans le cas contraire, le résultat est rejeté de l'analyse.

$$IQ (\%) = \sum_{i=1}^n \frac{G_{\text{mesuré}} - G_{\text{calculé}}}{n \times A} \times 100 \quad (4.1)$$

Où selon Baaj (2002), les paramètres sont les suivants :

$G_{\text{mesuré}}$	→	grandeur du signal mesuré;
$G_{\text{calculé}}$	→	grandeur du signal calculé;
n	→	nombre de points analysés (200 points);
A	→	amplitude du signal.

Le deuxième critère pour juger de la qualité d'un essai est l'écart relatif de l'amplitude de déformation d'un extensomètre ($\Delta\epsilon_{\text{ext}}$). Pour qu'un résultat soit jugé de bonne qualité, l'écart de chaque extensomètre par rapport à la moyenne doit être inférieur à 25 %.

Dans le cadre de cette recherche, les résultats des essais selon la fréquence de 0,01 Hz n'ont en aucun cas respecté les critères de qualités. Les résultats à 0,01 Hz n'ont donc pas été utilisés pour l'analyse ni le calcul des paramètres du modèle rhéologique 2S2P1D. Cela est probablement dû à un mauvais ajustement des réglages de la presse hydraulique MTS ou bien au fait qu'il s'agit d'une très faible fréquence et que le bitume est très déformable à cette fréquence.

Tableau 4.13 Caractéristiques des éprouvettes utilisées pour la mesure du module complexe

Enrobé	Éch.	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)	Masse (g)	d_{mb}	d_{mm}	% de vides
ESG-14R	P2B1X	122,6	74,1	1255,4	2,394	2,533	5,5
	P2B3X	118,7	74,2	1215,8	2,395		5,4
ESG-14V-10-B	P2B1X	123,94	74,2	1270,4	2,399	2,525	5,0
	P2C2X	118,21	74,1	1213,7	2,405		4,8

4.4.2.1 Courbes isothermes de l'éprouvette ESG-14R-P2B3X

Comme il a déjà été mentionné à la section 1.5.1.2, les courbes isothermes illustrent la variation du module en fonction de la fréquence. Les courbes isothermes de l'éprouvette ESG-14R-P2B3X sont présentées à la Figure 4.16 où l'on peut estimer de façon approximative que la norme du module complexe varie entre 80 et 30 000 MPa. Il est connu que la rigidité d'un EB varie de façon importante en fonction de la température et de la fréquence. De plus, on remarque que la variation de la fréquence a un impact important sur la rigidité de l'EB et ce, surtout pour les températures au-dessus de 0°C. Pour les températures

en dessous de 0°C, la variation de la fréquence a un impact moins marqué sur la rigidité de l'EB. On peut ainsi dire que le bitume utilisé présente une forte susceptibilité cinétique au niveau des températures au-dessus de 0°C. À noter que les résultats des essais réalisés à la fréquence de 0,01 Hz n'ont pas été utilisés pour tracer le graphique, car les résultats n'étaient conformes aux exigences par rapport à la qualité des résultats.

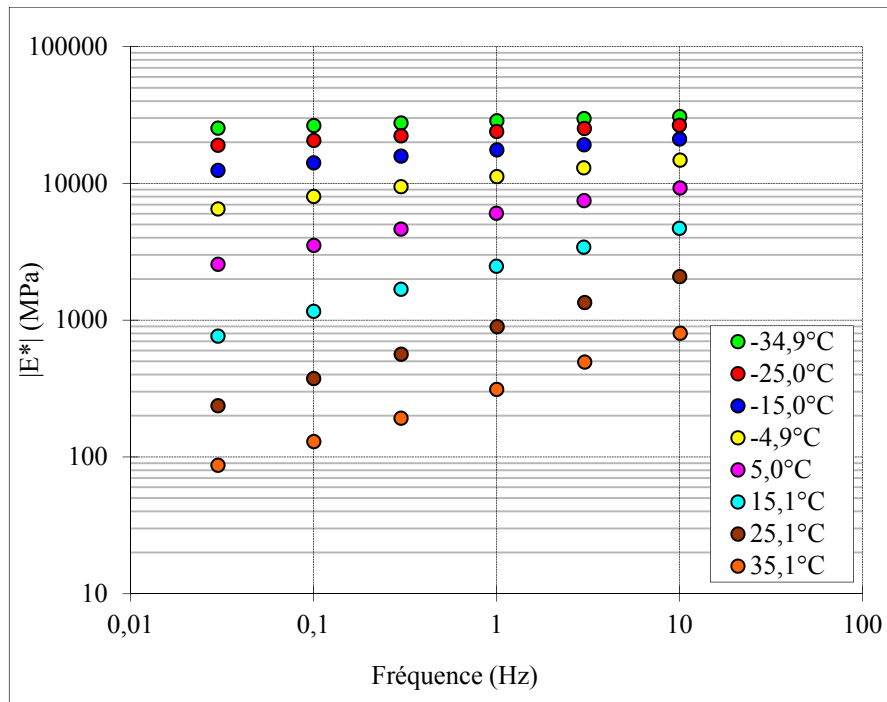


Figure 4.16 Courbes isotherme pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P)

4.4.2.2 Évolution du module complexe de l'éprouvette ESG-14R-P2B3X dans le plan Cole-Cole et dans l'espace de Black

Les résultats de l'essai ESG-14R-P2B3X dans le plan Cole-Cole sont présentés à la Figure 4.17. On remarque que les points expérimentaux diffèrent légèrement d'une courbe unique. Ainsi, on peut dire que ce matériau obéit partiellement au principe d'équivalence temps-température. Ce comportement est caractéristique des bitumes modifiés aux polymères (Di Benedetto et Corté, 2005).

Les résultats de l'essai ESG-14R-P2B3X sont illustrés à la Figure 4.18 selon l'espace de Black. On remarque qu'à haute température, il y a diminution de l'angle de phase. Ce comportement est dû au bitume puisqu'au-delà d'une certaine température, le bitume devient tellement mou qu'il n'intervient plus dans la rigidité de l'EB (Di Benedetto et Corté, 2005). Cette température limite dépend du type de bitume utilisé tandis que la valeur de rigidité dépend du squelette granulaire. Pour cet essai, on remarque une diminution de la rigidité à 35°C. De plus, on remarque aussi que les résultats ne suivent pas une courbe unique. Encore une fois, cela signifie que l'EB obéit partiellement au principe d'équivalence temps-température (Olard et Di Benedetto, 2003).

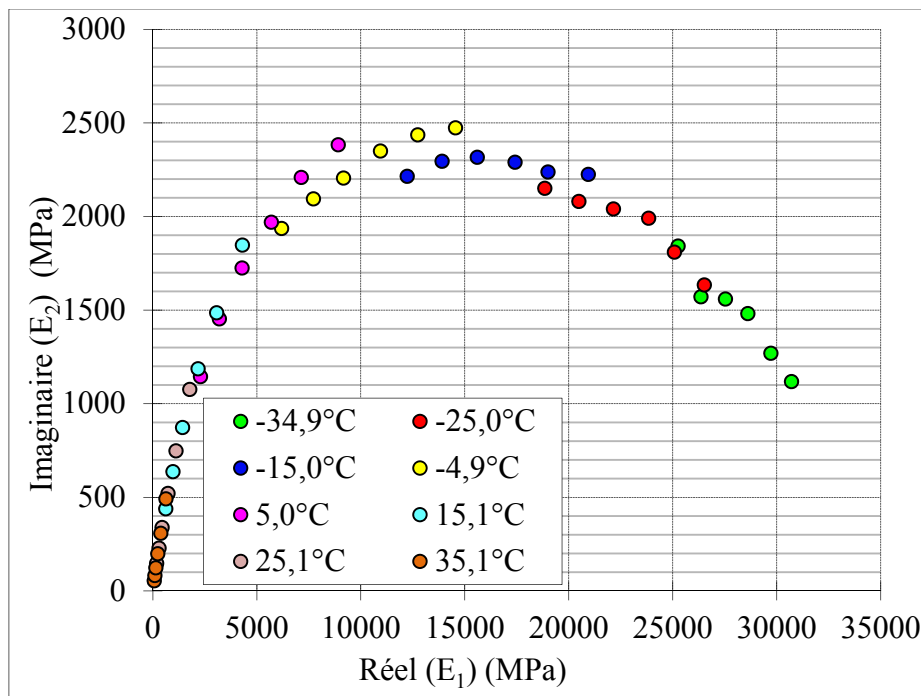


Figure 4.17 Plan Cole-Cole pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P)

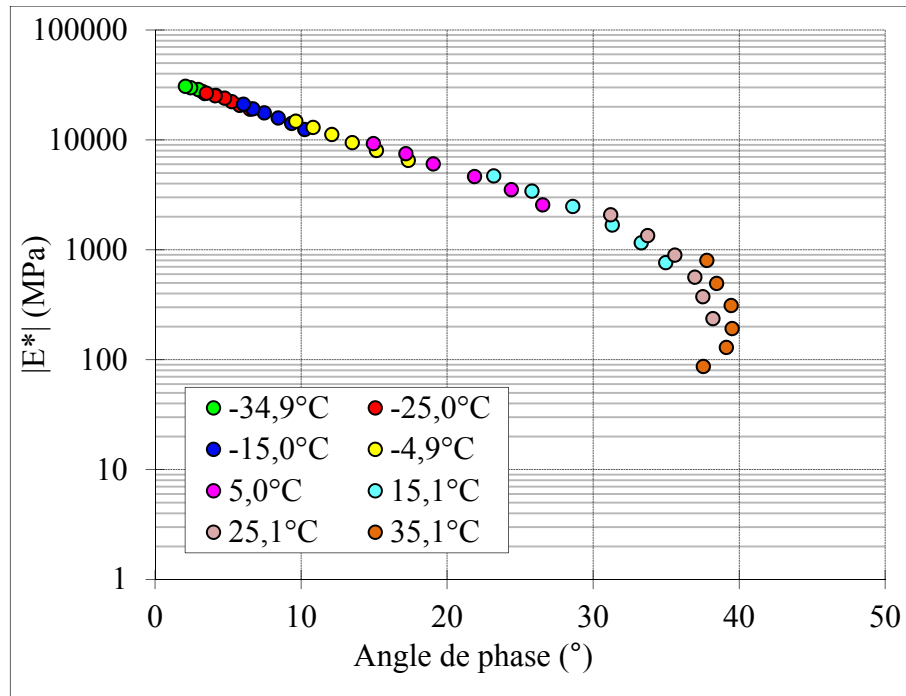


Figure 4.18 Résultats pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X dans l'espace de Black (PG 64-34P)

4.4.2.3 Courbe maîtresse à 10°C et variation des facteurs de translation de l'éprouvette ESG-14R-P2B3X

Dans le cadre de ce projet, les courbes maîtresses ont été tracées selon une température de 10°C. Les Figure 4.19 et Figure 4.20 illustrent la courbe maîtresse ainsi que la variation des facteurs de translation a_t expérimentaux utilisés pour la construction de la courbe maîtresse. Même si le matériau obéit partiellement au principe d'équivalence temps-température, l'équivalence est valide dans le domaine des fréquences considéré (Olard et Di Benedetto, 2003). On remarque sur la Figure 4.19 que la partie supérieure de la courbe maîtresse s'approche de façon asymptotique d'une valeur maximale de rigidité qui correspond à la rigidité maximale de l'EB. Sur la Figure 4.20, on retrouve les valeurs des facteurs de translation a_t utilisé ainsi que les facteurs a_t obtenus avec la loi WLF (section 1.5.1.4).

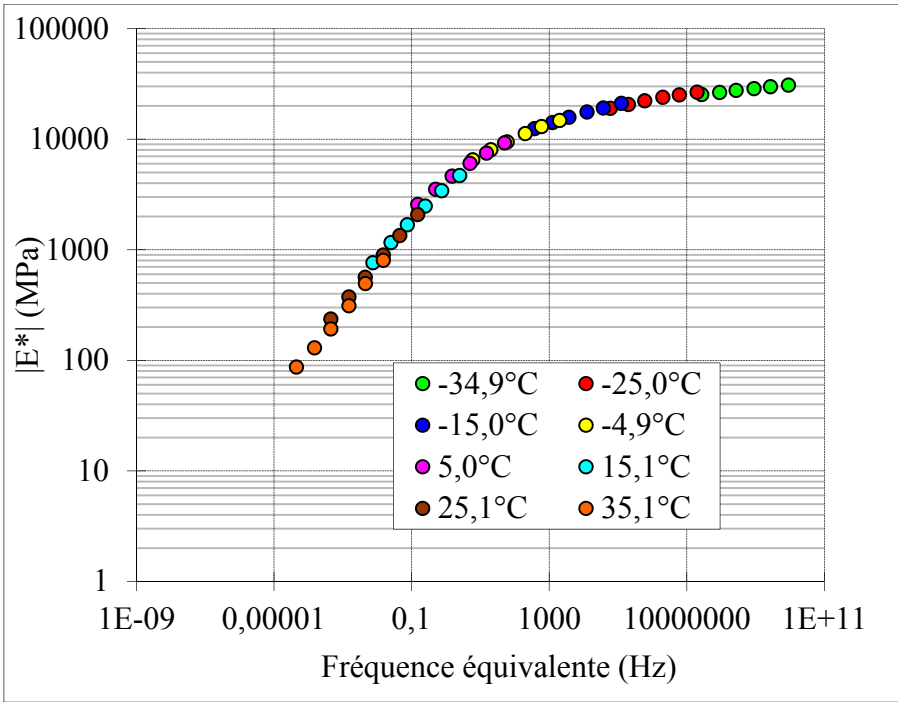


Figure 4.19 Courbe maîtresse (10°C) pour l'essai ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P)

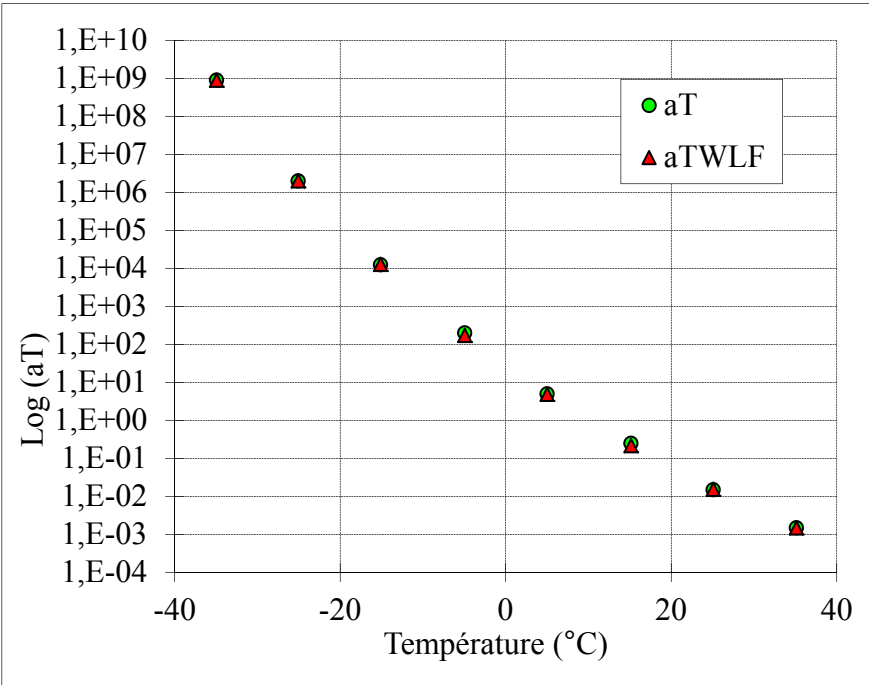


Figure 4.20 Variation des a_t en fonction de la température pour l'essai ESG-14R-P2B3X (PG 64-34P)

4.4.2.4 Paramètres 2S2P1D

Suite à la réalisation des essais, les résultats ont été utilisés afin de déterminer les paramètres du modèle rhéologique 2S2P1D. Comme il a déjà été mentionné à la section 1.5.1.3, les paramètres servent à la modélisation du comportement viscoélastique des EB en petites déformations. Ceux-ci ont été déterminés avec l'aide d'un fichier Excel de calibration. Les paramètres 2S2P1D des quatre essais réalisés sont présentés dans le Tableau 4.14.

Tableau 4.14 Paramètres du modèle 2S2P1D tiré des essais de module complexe
($T_{\text{ref}} = 10^{\circ}\text{C}$, $\tau_0 = 0,01 \text{ s}$)

Enrobé	ESG-14R- P2B1X	ESG-14R- P2B3X	ESG-14V- P2B1X	ESG-14V- P2C2X
Pourcentage de bitume (%)	4,96	4,96	4,53	4,53
V_i (%)	5,48	5,44	4,99	4,76
E_0 (MPa)	25	25	28	28
E_{00} (MPa)	37 000	36 000	34 000	36 000
k	0,15	0,16	0,16	0,16
h	0,48	0,48	0,48	0,48
δ	2,70	2,70	2,70	2,70
β	3 750	3 750	3 750	3 750
C_1	18,36	18,95	18,35	18,95
C_2	136,88	140,00	137,25	140,00

4.4.3 Essai de résistance à la fissuration par fatigue

L'essai de résistance à la fissuration par fatigue a été réalisé à 10°C et 10 Hz selon différents niveaux de sollicitations en contrôle de déformation sur des éprouvettes de chacun des enrobés testés tels que présenté au Tableau 5.2 et Tableau 5.3. Il est possible de tracer les résultats d'un essai de fatigue sur plusieurs graphiques. Certains des graphiques servent à vérifier la fiabilité de l'essai et d'autres permettent de déterminer la durée de vie de l'éprouvette. Les courbes suivantes sont utilisées lors de l'analyse :

1. Évolution de la température en fonction du nombre de cycles (N - T);
2. Évolution de la norme du module complexe en fonction du nombre de cycles (N - $|E^*|$);
3. Évolution de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles (N - ϕ);
4. Indice de qualité du signal de la contrainte, de la déformation ainsi que des trois extensomètres en fonction du nombre de cycles (N - IQ);
5. Évolution de l'amplitude de déformation des extensomètres et de la déformation moyenne en fonction du nombre de cycles (N - ε_{iA}) et (N - ε_A);
6. Évolution de l'écart entre les extensomètres en fonction du nombre de cycles (N - $\varepsilon_{\Delta ext}$);
7. Évolution de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles (N - σ_A);
8. Évolution du centre de contrainte (valeur moyenne) en fonction du nombre de cycles (N - σ_0);
9. Évolution du centre de déformation des extensomètres et la déformation moyenne en fonction du nombre de cycles (N - ε_{i0}) et (N - ε_0);
10. Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles (N - W_{dis}).

Afin de faciliter la compréhension et l'analyse des résultats, un seul résultat d'essai sera présenté dans cette section, soit l'essai réalisé sur l'éprouvette ESG-14R-P2C2X. Les résultats des autres essais seront présentés dans l'ANNEXE VI. De plus, une analyse approfondie sera présentée dans le prochain chapitre.

4.4.3.1 Évolution de la température

La Figure 4.21 illustre l'évolution de la température mesurée à la surface d'une éprouvette au cours d'un essai de résistance à la fatigue. Malgré le fait que l'enceinte soit thermorégulée à 10°C, on remarque un échauffement de l'éprouvette de l'ordre de 0,9°C jusqu'au cycle 15,000. Par la suite, la température se stabilise pour augmenter à nouveau suivant le 1 200 000^e cycle. Dans les essais de type déplacement imposé, l'échauffement est responsable d'une augmentation de la durée de vie des éprouvettes due à une diminution de la valeur du module de rigidité (Di Benedetto et Corté, 2005).

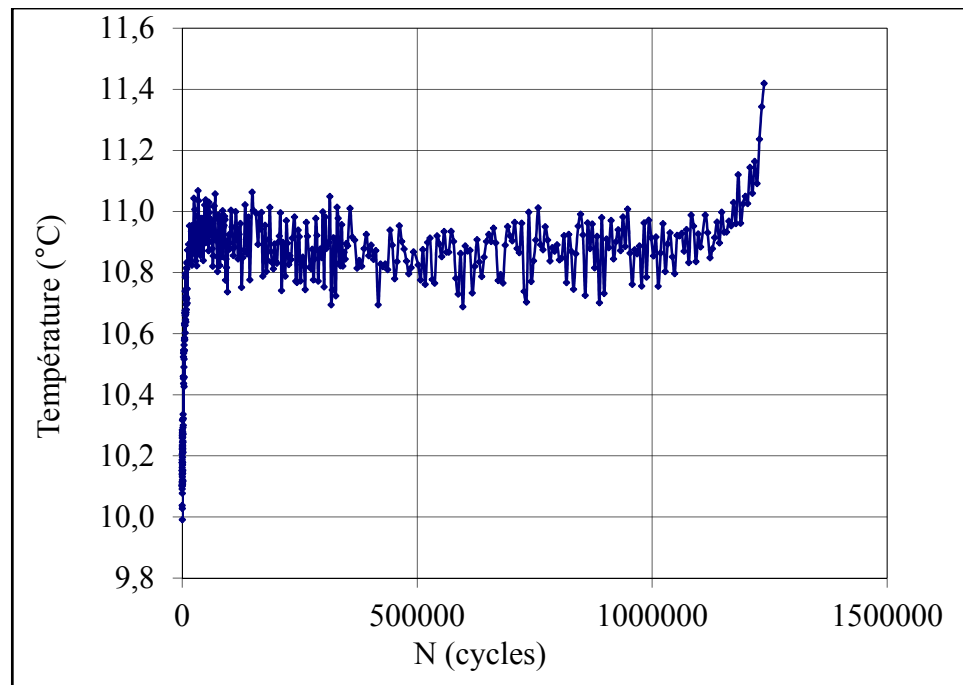


Figure 4.21 Évolution de la température en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.2 Évolution de la norme du module complexe

La Figure 4.22 illustre l'évolution de la norme du module complexe au cours de l'essai de résistance à la fatigue. On remarque durant les premiers cycles une diminution importante de la norme du module qui caractérise la phase I de l'essai. Cette diminution est liée aux effets biaisants des essais de fatigue tels que l'échauffement et la thixotropie. Par la suite, durant la phase II, la diminution de la norme du module est presque linéaire, et ce, bien que les effets biaisants soient toujours présents. Enfin, la transition entre les phases II et III représente l'apparition de macro fissures au sein de l'éprouvette ce qui engendre une diminution importante de la norme du module et souvent la rupture de l'éprouvette. Pour certains essais de fatigue, on peut observer graphiquement seulement les phases I et II. La Figure 4.22 illustre le cas où un essai présente les trois phases dans l'évolution du module. Cela signifie qu'il y a eu rupture de l'éprouvette en cours d'essai, ce qui n'est pas toujours le cas.

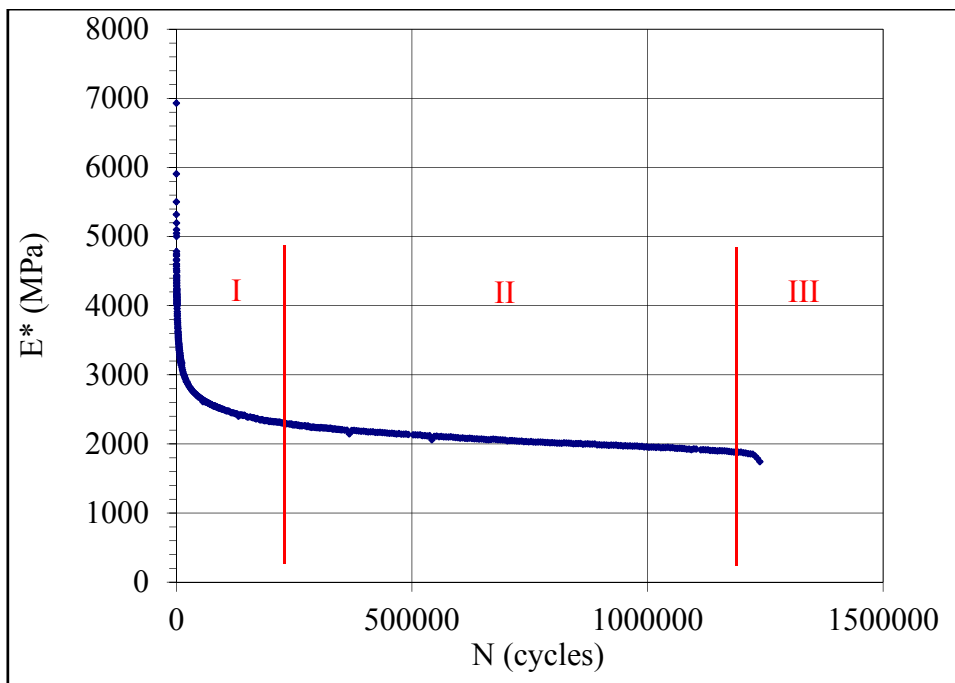


Figure 4.22 Évolution de la norme du module complexe en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X (ESG14; PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230\text{ }\mu\text{m/m}$)

4.4.3.3 Évolution de l'angle de phase

La Figure 4.23 illustre la variation de l'angle de phase durant un essai de fatigue. Au début de l'essai, on remarque une augmentation rapide de la valeur de l'angle de phase qui s'atténue par la suite. La fin de l'essai est marquée par une augmentation ou une diminution rapide de l'angle de phase et qui traduit la gravité de l'endommagement.

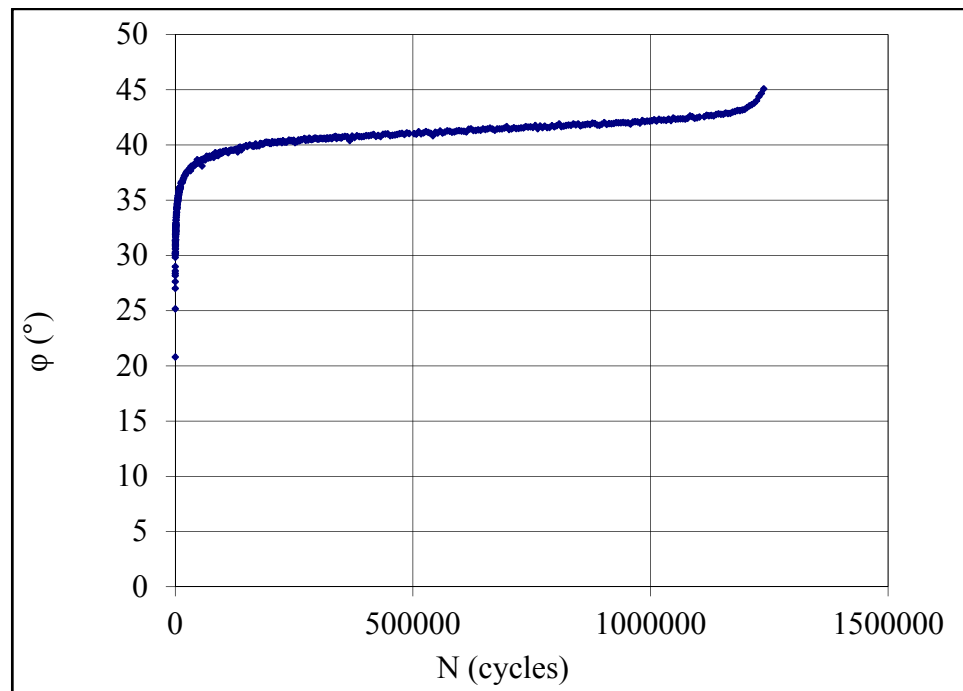


Figure 4.23 Variation de l'angle de phase en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X
(ESG14; PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.4 Indice de qualité des signaux

La Figure 4.24 illustre l'évolution des indices de qualités du signal de la contrainte, de la déformation ainsi que des trois extensomètres. Pour un essai de résistance à la fatigue, la valeur maximale acceptable pour les indices de qualités est fixée à 15 %. Dans le cadre de cet essai, on remarque les indices de qualités sont inférieurs à 5 % et ce, jusqu'à la fin de l'essai où les indices de qualités augmentent rapidement.

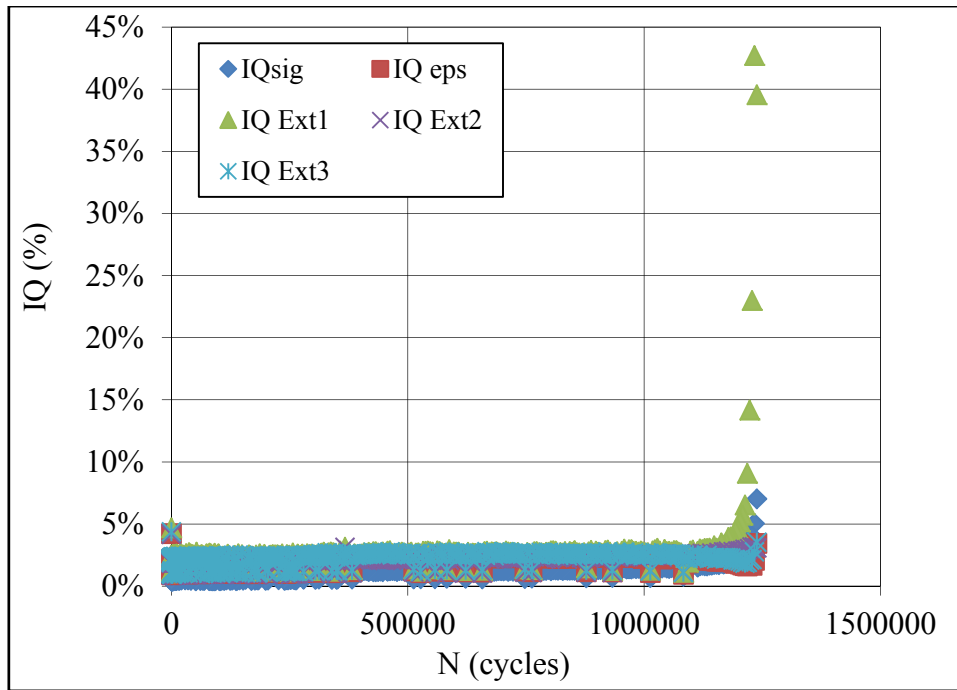


Figure 4.24 Évolution des indices de qualités des signaux en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.5 Évolution de la déformation

La Figure 4.25 illustre l'évolution de l'amplitude de la déformation de chacun des trois extensomètres ainsi que la valeur moyenne d'amplitude en cours d'essai de fatigue. Ces informations sont très importantes, car dans le cas d'un essai en contrôle de déformation, le pilotage se fait par l'entremise des extensomètres qui transmettent les informations au système de contrôle de la presse. Dans le cas de l'essai présenté, l'amplitude de déformation visée est de $230 \mu\text{m/m}$.

Selon les résultats de la Figure 4.25, on remarque que la valeur moyenne de déformation est très près de la valeur cible et reste constante durant la majorité de l'essai. Lorsque la valeur d'amplitude de déformation chute, cela veut dire qu'il y a rupture de l'éprouvette. En revanche, les courbes d'amplitudes de déformation de chacun des extensomètres sont très différentes et varient en cours d'essai. L'extensomètre #3 présente une faible variation

comparativement aux deux autres extensomètres. En effet, les extensomètres #1 et #2 varient de façon importante durant l'essai. Cette différence entre les trois extensomètres est due principalement à la non-homogénéité de l'éprouvette et/ou au désaxage de la force appliquée (Baaj, 2002).

Les enrobés bitumineux sont des matériaux très hétérogènes. Pour minimiser le plus possible l'hétérogénéité, il est important de faire preuve de minutie lors de la fabrication des plaques d'enrobés tant au niveau du malaxage que du compactage. De plus, afin d'éviter l'excentrement de la force appliquée, il est important de faire preuve de soin lors du carottage et du collage des casques des éprouvettes. Lors du collage des casques des éprouvettes, il est important de bien centrer l'éprouvette et de s'assurer du parallélisme des casques.

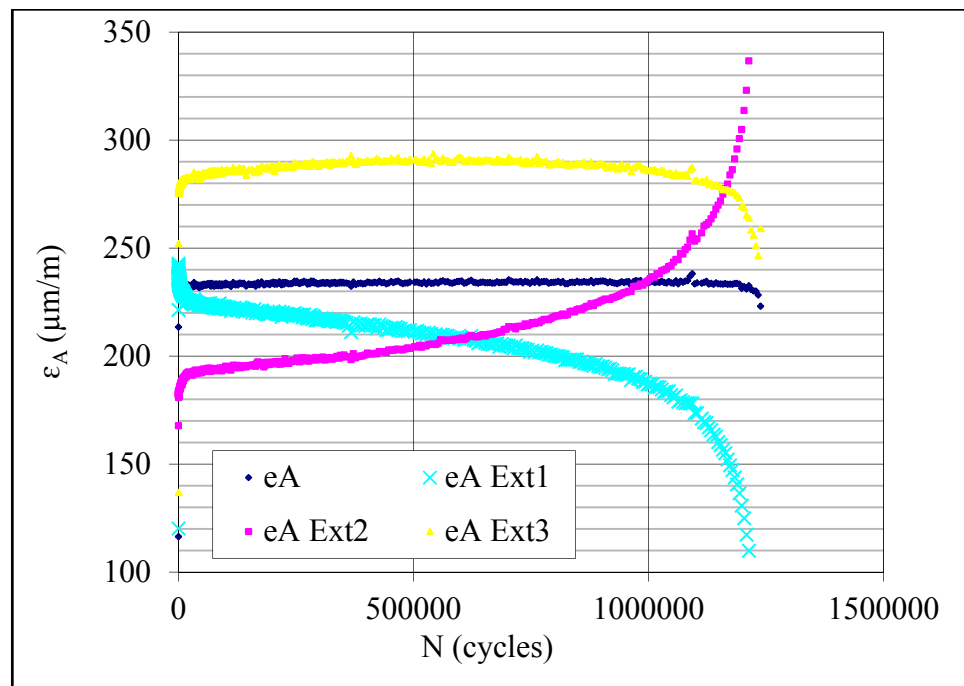


Figure 4.25 Évolution de l'amplitude de déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X
(ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$;
 $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \text{ } \mu\text{m/m}$)

La Figure 4.26 illustre l'écart entre les extensomètres au cours de l'essai de fatigue et permet de juger de l'état d'homogénéité du champ de déformation au sein du corps de l'éprouvette. L'essai est considéré comme étant non homogène lorsque l'écart d'un extensomètre dépasse la valeur de 25 % (Baaj, 2002). Le nombre de cycles associé à un écart de plus de 25 % permet d'identifier la durée de vie associée au critère de rupture $N_{f\Delta ext}$.

Pour l'éprouvette ESG-14R-P2C2X, on remarque une variation importante des écarts entre les extensomètres en cours d'essai. Les extensomètres #2 et #3 débutent l'essai avec un écart élevé ce qui témoigne de l'hétérogénéité du champ de contrainte. Pour l'extensomètre #3, la valeur de l'écart reste relativement constante durant l'essai, mais près de la limite de 25 %. Les extensomètres #1 et #2 présentent une grande variation des écarts durant l'essai. La durée de vie de cette éprouvette est de 1 093 165 cycles selon le critère $N_{f\Delta ext1}$.

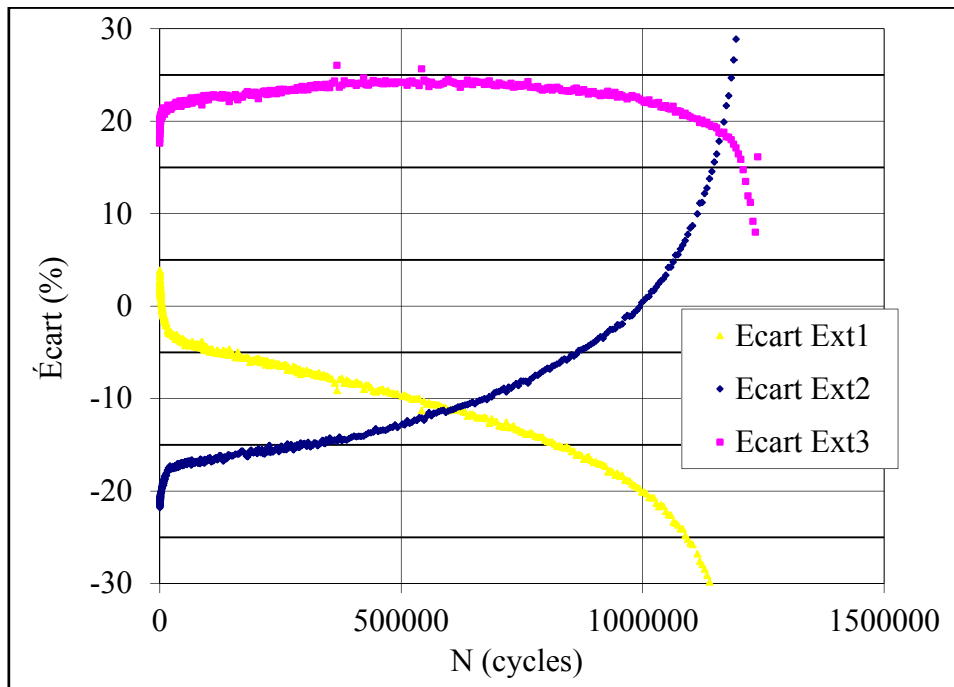


Figure 4.26 Évolution de l'écart entre les extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X
(ESG14 PG 64-34P; $T_{consigne} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.6 Évolution de l'amplitude de contrainte

La Figure 4.27 illustre la variation de l'amplitude de contrainte pour l'éprouvette ESG-14R-P2C2X lors de la réalisation de l'essai de fatigue. Étant donné que les essais réalisés se sont déroulés en contrôle de déformation, il est normal que la contrainte appliquée varie en cours d'essai. Au début de l'essai, la contrainte nécessaire à l'obtention de la déformation souhaitée est grande. Au fur et à mesure que l'essai avance, le module de rigidité de l'éprouvette diminue ce qui engendre une diminution de l'amplitude de contrainte. De cette façon, la courbe d'évolution de l'amplitude de contrainte à la même allure que la courbe d'évolution de la norme du module.

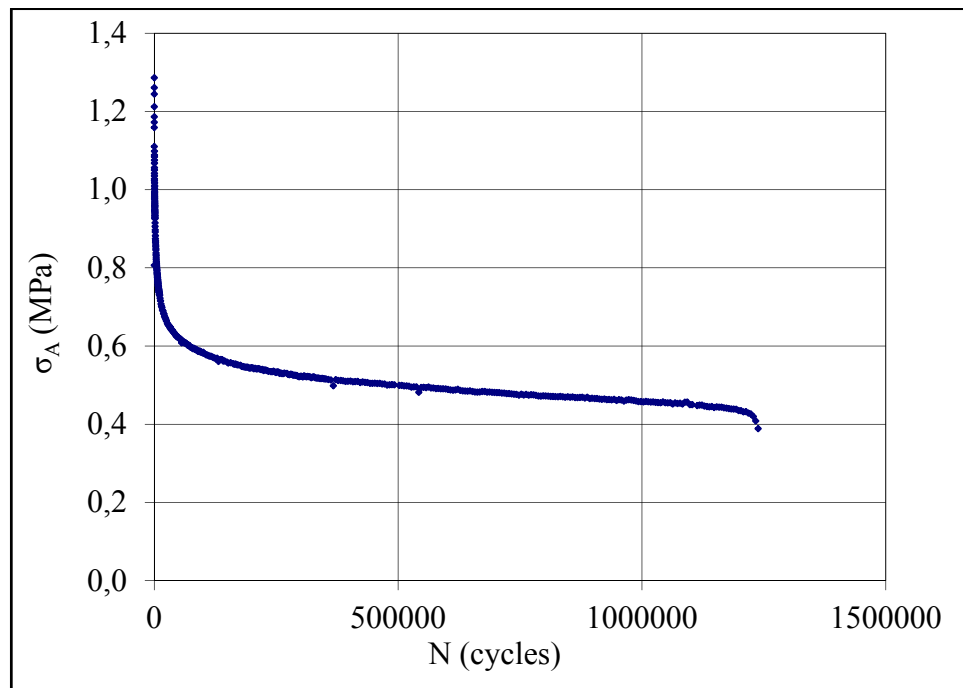


Figure 4.27 Variation de l'amplitude de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X
(ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.7 Évolution du centre de contrainte

La Figure 4.27 illustre l'évolution du centre de contrainte (valeur moyenne) de l'éprouvette ESG-14R-P2C2X durant l'essai de fatigue. En contrôle de déformation, la contrainte est la réponse du matériau à la sollicitation. On remarque que durant les premiers cycles, le centre de contrainte évolue de façon rapide pour se stabiliser par la suite. Des valeurs proches de zéro signifient que l'éprouvette se relaxe en cours d'essai (Baaj, 2002). Dans le cadre de cet essai, les valeurs se situent près de zéro après s'être stabilisée.

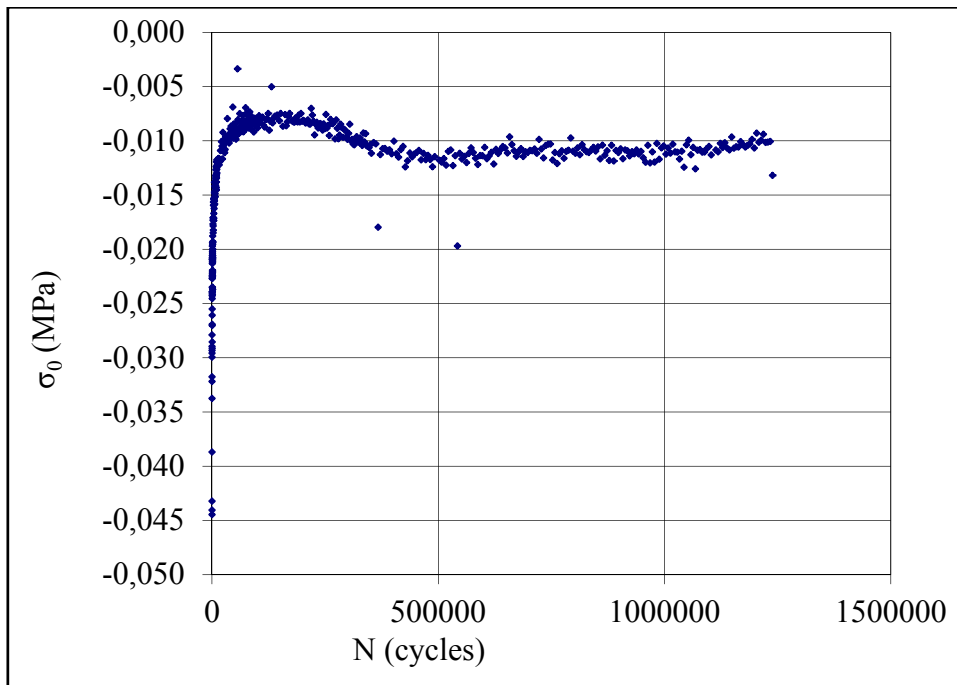


Figure 4.28 Variation du centre de contrainte en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X
(ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.8 Évolution du centre de déformation

La Figure 4.29 illustre l'évolution du centre de déformation des extensomètres et de la valeur moyenne durant l'essai. Ces courbes représentent l'évolution de la valeur moyenne du centre de déformation ou la déformation permanente de l'éprouvette en fonction du nombre de

cycles (Baaj, 2002). Étant donné que l'essai est réalisé en contrôle de déplacement, la valeur moyenne du centre de déformation est maintenue constante par le système durant l'essai. Les valeurs du centre de déformation des extensomètres varient en cours d'essai. Cela est dû à l'endommagement que subit l'éprouvette. Une valeur positive signifie que l'extensomètre subit une extension durant l'essai tandis qu'une valeur négative signifie que l'extensomètre subit une contraction durant l'essai.

Pour l'extensomètre #1 et #2 on remarque que les valeurs maximales obtenues en cours d'essai sont de l'ordre de 190 et 170 $\mu\text{m/m}$ respectivement. Ces valeurs représentent une extension de 9,5 et 8,5 microns. Pour l'extensomètre #3, on remarque une contraction de l'ordre de 105 μdef ce qui représente 5,25 microns. Ces valeurs d'extension et de contraction sont relativement faibles.

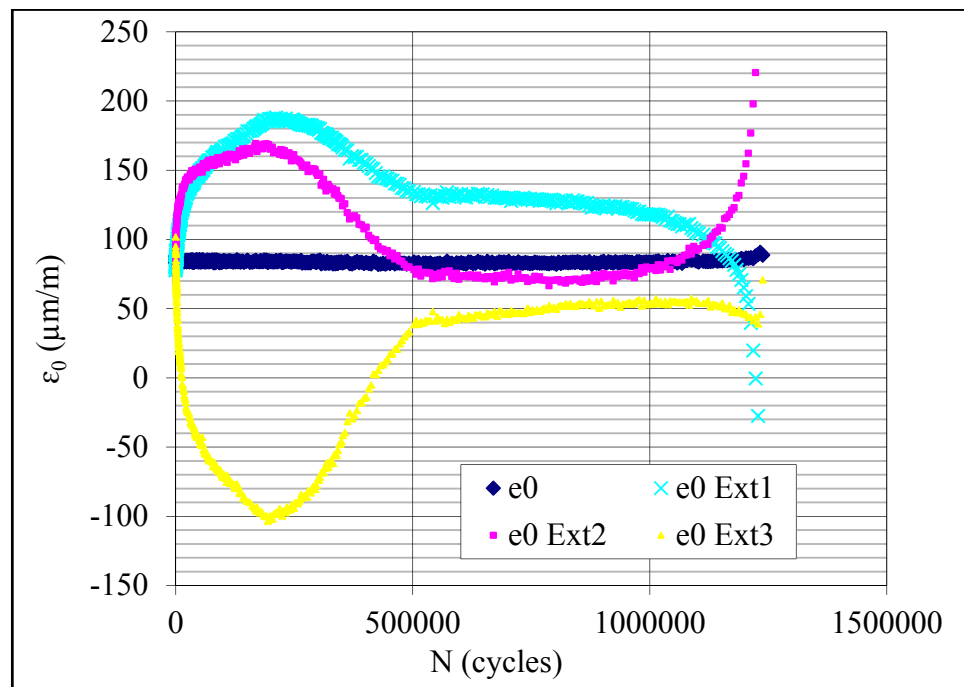


Figure 4.29 Évolution du centre de déformation des extensomètres en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\epsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.3.9 Évolution de l'énergie dissipée

Dans les essais en contrôle de déformation, l'énergie dissipée suit généralement une fonction décroissante en fonction du nombre de cycles. Par contre, étant donné que l'énergie dissipée dépend de la contrainte, de la déformation et de l'angle de phase ($W_d = \pi * \sigma * \varepsilon * \sin(\varphi)$), il est possible d'observer des cas contraires surtout pour les essais en contrôle de déplacement (Baaj, 2002). Dans le cas de l'essai type, les résultats obéissent à cette règle voulant que l'énergie dissipée diminue en fonction du nombre de cycles.

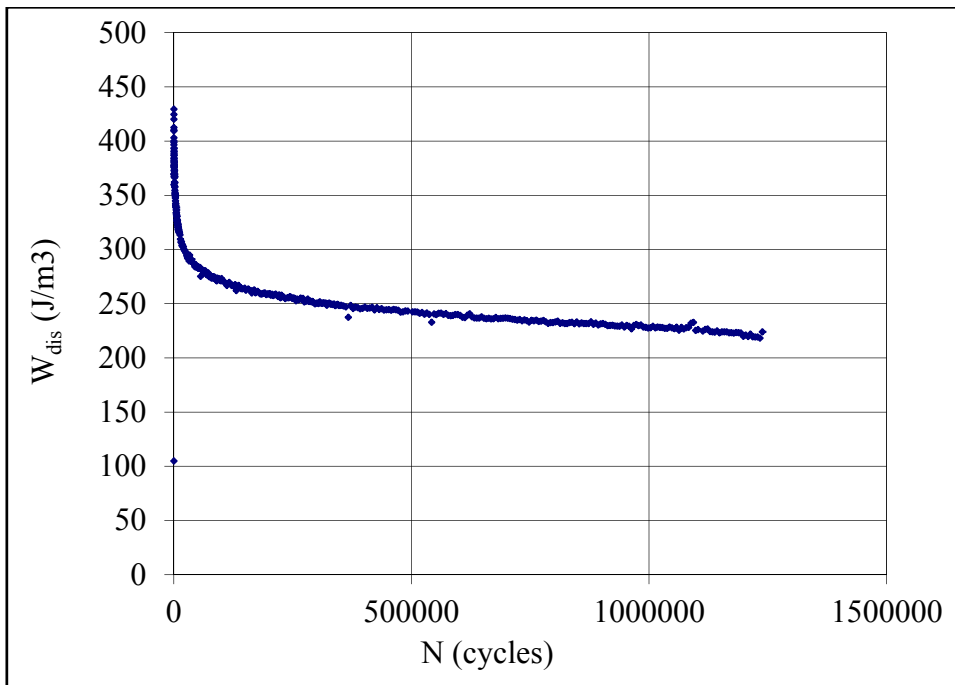


Figure 4.30 Évolution de l'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour l'essai ESG-14R-P2C2X (ESG14 PG 64-34P; $T_{consigne} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$; $\varepsilon_a = 230 \mu\text{m/m}$)

4.4.4 Évaluation des caractéristiques physiques

Dans la section suivante, les résultats des essais de mesures des caractéristiques physiques seront présentés. Les essais réalisés sont : 1) Évaluation de la macro texture par hauteur de sable, 2) Mesure de l'adhérence au pendule SRT. Ces essais ont été réalisés sur les deux EB suivant : 1) ESG-14R, 2) ESG-14V-10-B.

4.4.4.1 Évaluation de la macro texture par hauteur de sable

Cet essai vise à évaluer la macrotexture d'un enrobé bitumineux et permettre la comparaison entre différents EB. Dans le cadre de ce projet, l'essai a été réalisé sur ESG-14R ainsi que ESG-14V-10-B. Les résultats présentés dans le Tableau 4.15 sont les moyennes de trois mesures réalisées sur chaque plaque.

Tableau 4.15 Résultats des essais d'évaluation de la macrotexture

Échantillon	ESG-14R	ESG-14V-10-B
Volume matériau de mesure (mm ³)	9 741,4	9 741,4
Diamètre moyen mesuré (mm ²)	93,1	91,8
PMM (mm)	1,43	1,47

Selon les résultats obtenus, l'ajout de particules de verre ne semble pas affecter la macrotexture d'un EB. La différence de profondeur moyenne de macro texture (PMM) entre les deux plaques d'enrobé est de l'ordre de 0,04 mm, ce qui est très faible. Il est important de noter que cette similitude est due au fait que la granularité des deux EB est très similaire.

4.4.4.2 Mesure de l'adhérence au pendule SRT

L'essai de mesure de l'adhérence au pendule SRT vise à évaluer l'adhérence d'un EB. Dans le cadre de ce projet, l'essai a été réalisé sur ESG-14R ainsi que ESG-14V-10-B. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.16. Plus la valeur de lecture est faible, plus le matériau est rugueux. Selon les résultats obtenus, on remarque une différence minime entre la surface des deux EB testés ce qui veut dire que l'ajout de particules de verre ne modifie pas significativement la rugosité de surface de l'EB.

Tableau 4.16 Résultats des essais de mesure de l'adhérence

Échantillon	ESG-14R	ESG-14V-10-B
Moyenne des valeurs lues	62,38	61,25
<i>Les valeurs moyennes présentées sont la moyenne de quatre lectures</i>		

4.4.5 Évaluation de la durabilité

La durabilité des deux EB a été évaluée au moyen de l'essai de tenue à l'eau avec la presse Marshall. Comme indiqué à la section 3.4.4.1, deux lots d'éprouvettes par EB ont été testés soit avec ou sans vieillissement accéléré. Les résultats des essais de la mesure de la tenue à l'eau sont présentés dans le Tableau 4.17. On peut constater que pour les deux EB, la tenue à l'eau respecte les exigences de la norme LC 4202. Par contre, on remarque que la perte de stabilité est plus importante pour l'EB incorporant des particules de verre.

4.5 Sommaire des résultats des essais réalisés

Dans le cadre de la phase III de ce projet, deux EB ont été confectionnés et testés, soit les ESG-14R et l'ESG-14V-10-B. Les caractéristiques ainsi que les résultats des essais sont regroupés dans le Tableau 4.18.

Tableau 4.18 Sommaire des résultats des essais réalisés

Paramètres	Enrobé	
	ESG-14R	ESG-14V-10-B
Grade de bitume	PG 64-34P	PG 64-34P
% de bitume (massique par rapport à la masse totale)	4,96	4,53
V_{be} (%)	11,41	10,66
d_{mm}	2,533	2,525
Nombre de girations	PCG (% de vides)	
10	15,6	15,2
100	5,6	7,3
200	3,2	5,6
Nombre de cycles	Orniérage	
	Profondeur moyenne des ornières (%)	
1 000	4,4	2,5
3 000	5,2	3,3
10 000	6,2	4,5
30 000	7,0	6,4
	Module complexe	
E_{00} (MPa)	25	28
E_0 (MPa)	36 500	35 000
E^* (10°C, 10 Hz)	7 365	7 042

Paramètres	Enrobé	
	ESG-14R	ESG-14V-10-B
	TSRST	
Contrainte de rupture (MPa)	3,6	3,0
Température de rupture (°C)	-34,1	-34,1
Température de transition vitreuse (°C)	-29,17	-28,34
	Fatigue	
$\varepsilon_6 N_{f_{II/III}} (\mu def)$	245,4	235,8
Pente b	-0,131	-0,126
c_1	4,08E+33	1,41E-23
c_2	7,65	7,96
	Durabilité	
Tenue à l'eau (%)	99,33	87,71
	Macro texture	
PMM (mm)	1,43	1,47
	Adhérence au pendule SRT	
	62,38	61,25

CHAPITRE 5

ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans le cadre de ce chapitre, nous analyserons en détail les résultats des essais thermomécaniques (TM) obtenus pour l'enrobé incorporant des particules de verre et l'enrobé de référence. L'analyse vise à mettre en perspective l'ajout de particules de verre dans les enrobés bitumineux du point de vue des performances TM.

5.1 Essai de retrait thermique empêché (TSRST)

En considérant les paramètres d'essais qui caractérisent les résultats de TSRST (T° de transition vitreuse et bissectrice, Pente #1 et #2) tel que présenté au Tableau 4.12, on remarque que les valeurs obtenues pour les deux EB sont pratiquement similaires, à l'exception de la température de transition vitreuse et de la pente #2.

Lors d'un essai de TSRST, la température de transition vitreuse représente la fin de la période de relaxation du matériau et le début d'un comportement « élastique », lequel est marqué par une relation linéaire entre la température et la contrainte induite tandis que la température de transition bissectrice représente la jonction de la pente #1 et #2 (Meunier, 2005). En d'autres mots, la température de transition vitreuse (T_g) indique la température à laquelle les contraintes évoluent de façon différente dans l'EB. Au-dessus de cette température, on dit que les contraintes induites par une variation de la température sont majoritairement dissipées par le bitume, l'EB libère les contraintes (Carter, 2002). Cette libération de contrainte par l'EB caractérise le phénomène de relaxation de ce matériau et correspond à une évolution de la contrainte pour une déformation constante (Di Benedetto et Corté, 2005). L'EB de référence possède une T_g moyenne de $-29,17^\circ\text{C}$ comparativement à l'EB avec verre qui possède une T_g moyenne de $-28,34^\circ\text{C}$. On peut ainsi dire que l'EB de référence présente un potentiel de relaxation légèrement plus élevée que l'EB avec verre.

Par la suite, la pente #1 représente le comportement du matériau pendant la période de relaxation tandis que la pente #2 donne une bonne indication de la sensibilité thermique de l'enrobé (Perraton et Olard, 2013). En effet, plus la pente #2 est forte, plus les contraintes thermiques augmenteront rapidement en fonction de la température. Notons que la température de rupture se situe généralement autour de la température basse du grade PG du bitume utilisé (Perraton et Olard, 2013). Dans des conditions de variation de volume empêché, l'apparition de contraintes au sein de l'EB dépend de trois facteurs soit : 1) variation de température, 2) module de rigidité de l'EB, 3) coefficient de dilatation thermique. Étant donné que le bitume possède un plus grand coefficient de dilatation thermique que les granulats, le coefficient de dilatation thermique globale de l'EB est donc gouverné par le bitume et par le fait même, par la quantité de bitume. Plus la quantité de bitume est importante, plus le coefficient de dilatation thermique globale de l'EB est élevé, ce qui augmente la susceptibilité thermique de l'EB (Carter, 2002). Il est possible d'évaluer la susceptibilité thermique d'un EB soumis à un essai de TSRST en regardant les valeurs de la pente #2. Pour une variation de température donnée et ce, en dessous de la température de transition vitreuse, plus la valeur de la pente #2 est élevée, plus la variation des contraintes au sein de l'EB est importante. À cet effet, on remarque que l'EB avec verre présente une pente #2 de -0,179 ce qui est plus faible que l'EB de référence (-0,207). Cela veut donc dire que l'EB de référence va développer plus de contraintes que l'EB avec verre pour une même variation de température. Étant donné que la quantité de bitume dans l'EB de référence est plus élevée que l'EB avec verre, il n'est pas surprenant de constater que la susceptibilité thermique de l'EB de référence est plus élevée que l'EB avec verre.

Il est connu que le paramètre déterminant au niveau de la résistance au retrait thermique est le type de bitume. De façon générale, une teneur en bitume plus élevée permet à un enrobé d'avoir de meilleures performances face à la fissuration thermique, car sa déformabilité est augmentée (Carter, 2002). Par contre, tant et aussi longtemps que la quantité de bitume reste autour de la valeur optimale, une faible variation de la teneur en bitume n'a pas une grande influence sur la résistance à la fissuration thermique. Dans ce cas si on remarque qu'une faible diminution de la teneur en bitume ainsi que l'ajout de particules de verre ne semble pas

avoir d'impact majeur sur les résultats de TSRST au niveau de la contrainte maximale de rupture ainsi que la température de rupture.

5.2 Essai de détermination du module complexe

Comme il a été mentionné à la section 4.4.2, deux éprouvettes ont été utilisées pour déterminer les valeurs de module complexe pour chacun des deux EB testés. Avant de procéder à l'analyse et la comparaison des résultats des deux EB, un exercice a été fait afin de vérifier la répétabilité entre les deux éprouvettes testées pour chaque EB. Le principe consiste à choisir une éprouvette comme référence et de calculer le ratio de la norme du module complexe de la deuxième éprouvette par rapport à l'éprouvette de référence.

La validation se fait au moyen du coefficient de rigidité (C^*) qui est caractérisée par une norme ($|C^*|$) ainsi qu'un angle de phase (φ_{C^*}). Le calcul de la norme du coefficient se fait avec l'aide de l'équation (5.1). De plus, l'écart relatif entre la norme du module complexe de la 2^e éprouvette et celle de l'éprouvette de référence, exprimé de manière relative à la norme du module complexe de l'éprouvette de référence, a aussi été calculé avec l'aide de l'équation (5.2). Les différences au niveau de l'angle de phase sont calculées à partir de l'équation (5.3). Les valeurs de la norme de module complexe utilisées pour calculer la norme de $|C^*|$ ainsi que φ_{C^*} sont tirés des résultats expérimentaux des courbes maîtresses où les résultats sont exprimés en fonction de fréquence équivalente. Le Tableau 5.1 présente les écarts maximums obtenus de cette analyse.

$$|C^*(T, Fr)| = \frac{|E^*_{\text{épreuve}}(T, Fr)|}{|E^*_{\text{épreuve référence}}(T, Fr)|} \quad (5.1)$$

$$\Delta |E^*(T, Fr)| (\%) = \frac{|E^*_{\text{épreuve}}(T, Fr)| - |E^*_{\text{épreuve référence}}(T, Fr)|}{|E^*_{\text{épreuve référence}}(T, Fr)|} \times 100 \quad (5.2)$$

$$\varphi_{C*} = \varphi_{Ei} - \varphi_{ER} \quad (5.3)$$

Où les paramètres sont les suivants :

- φ_{C*} → Angle de phase du coefficient de rigidité;
 φ_{Ei} → Angle de phase de l'EB à comparer;
 φ_{ER} → Angle de phase de l'EB de référence

Tableau 5.1 Validation de la répétabilité de l'essai de module complexe pour chacun des enrobés testés

Enrobé	Éprouvette	% vides	Étendu des écarts calculés					
			Max		Min		Max	Min
			$ C^* $ (éq. 5.1)	$\Delta E^* $ (%) (éq. 5.2)	$ C^* $ (éq. 5.1)	$\Delta E^* $ (%) (éq. 5.2)	φ_{C*} (°) (éq. 5.3)	
ESG-14R	P2B1X (réf)	5,5	1,03	2,8	1,01	0,8	0	-0,4
	P2B3X	5,4						
ESG-14V-10-B	P2B1X (réf)	5,0	0,94	5,5	0,99	-1,4	0	-0,9
	P2C2X	4,8						

Les résultats du Tableau 5.1 montrent que l'écart maximal entre deux essais pour un même EB est très faible. Pour l'EB de référence, la plus grande différence entre les deux essais au niveau du $|C^*|$ est de l'ordre de 1,03. Cela veut dire que dans le cas extrême, l'éprouvette P2B3X est 1,03 fois plus rigide que l'éprouvette P2B1X selon une température et une

fréquence donnée. Pour l'EB avec verre, la plus grande différence est de l'ordre de 0,94, ce qui veut dire que l'éprouvette P2C2X est 0,94 fois moins rigide que l'éprouvette P2B1X. En ce qui concerne les angles de phase, les écarts entre les deux éprouvettes des EB sont aussi très faibles. Puisque les écarts maximaux entre les deux éprouvettes d'un même EB sont très faibles, on peut conclure que les deux essais réalisés pour chacun des EB sont représentatifs du comportement de l'EB et pour comparaison, nous allons travailler sur une seule éprouvette par EB testé.

5.2.1 Écart des essais de module complexe dans un domaine fréquentiel équivalent

Pour vérifier s'il y a des différences au niveau des résultats de module complexe entre les deux EB, il convient de comparer les normes des modules complexes ainsi que les angles de phase dans un domaine fréquentiel équivalent. Comme il a été mentionné à la section 5.2, il est possible de quantifier les écarts entre deux essais de module avec le coefficient de rigidité complexe (C^*). Ce coefficient peut être décomposé en deux paramètres, soit la norme ($|C^*|$) et l'angle de phase (φ_{C^*}). La norme du coefficient de rigidité se calcule avec l'équation (5.1) tandis que l'angle de phase se calcule avec l'équation (5.3). À noter que pour cette analyse, les paramètres du coefficient de rigidité seront calculés pour l'éprouvette ESG-14V-P2B1X (avec verre) par rapport à l'ESG-14R-P2B3X (référence).

Les Figure 5.1 et Figure 5.2 illustrent l'évolution de $|C^*|$ ainsi que celle de φ_{C^*} . Il est important de souligner le fait que la valeur de $|C^*|$ de l'EB de référence est de 1 et que la valeur de φ_{C^*} du coefficient de rigidité de l'EB de référence est nulle. Les lignes discontinues représentent la plage de mesure des essais de laboratoire (0,01 à 10 Hz) converti en fréquence équivalente.

Sur la Figure 5.1, on remarque que l'amplitude du $|C^*|$ pour l'ESG-14V-P2B1X est très faible, ce qui signifie qu'il y a très peu d'écart entre les normes des modules complexes testés. Avant d'analyser la variation de φ_{C^*} il convient de définir les conventions de signes. Une valeur négative de φ_{C^*} signifie que l'ESG-14V-P2B1X présente une composante

visqueuse moins importante que l'EB de référence. Dans le cas où φ_{C^*} est positif, cela signifie que l'ESG-14V-P2B1X est plus visqueux que l'EB de référence. Par ailleurs, les résultats de la Figure 5.2 montre que φ_{C^*} de l'EB avec verre varie par rapport à l'EB de référence. Malgré le fait que l'on observe de faibles différences au niveau de la norme du module, en analysant les différences au niveau de l'angle de phase, les résultats portent à croire que l'ajout de particules de verre semble modifier la rhéologie de l'EB puisqu'il y a variation de l'angle de phase. Une différence de $0,5^\circ$ entre les deux EB représente 3 % de différence, ce qui n'est pas très significatif. Par contre, comme la quantité de bitume dans l'EB avec verre est moindre que l'EB de référence, les résultats similaires obtenus au niveau de la rigidité portent à croire que le verre modifie le comportement rhéologique de l'EB.

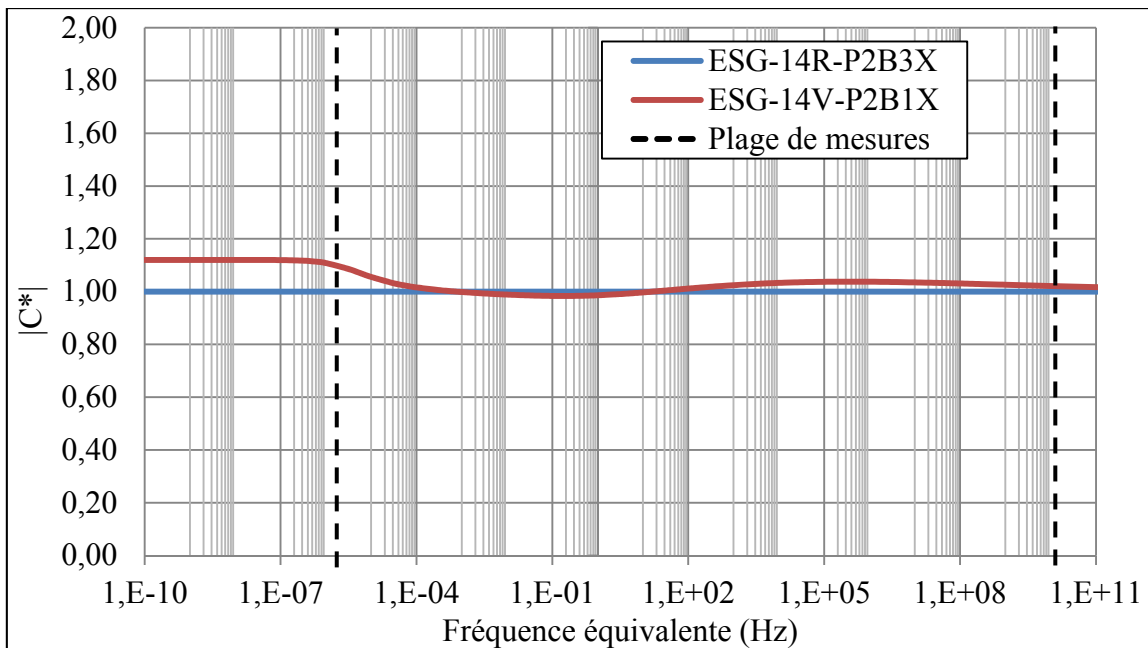


Figure 5.1 Évolution de la norme du coefficient de rigidité dans le domaine de fréquence équivalente pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X par rapport à l'éprouvette ESG-14V-P2B1X

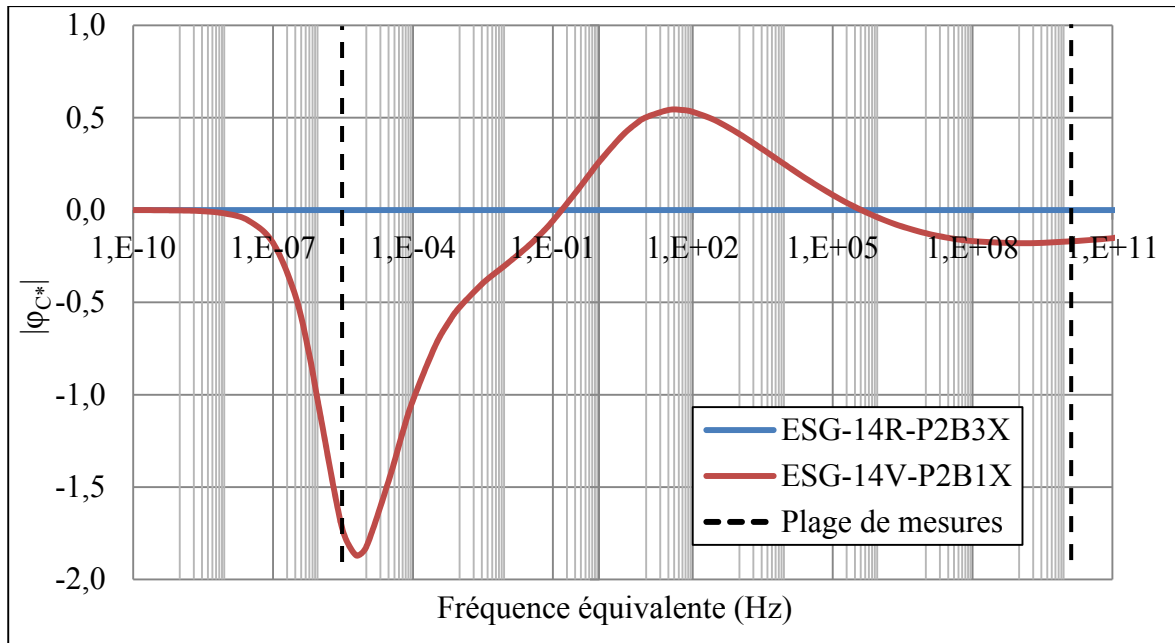


Figure 5.2 Évolution de l'angle de phase du coefficient de rigidité dans le domaine de fréquence équivalente pour l'éprouvette ESG-14R-P2B3X par rapport à l'éprouvette ESG-14V-P2B1X

5.2.2 Analyse des courbes dans le plan Cole-Cole

Les résultats des éprouvettes ESG-14R-P2B3X et ESG-14V-P2B1X ont été sélectionnés pour analyser et comparer la réponse en petites déformations entre l'EB de référence et l'EB incorporant des particules de verre. Ces éprouvettes ont été choisies, car ce sont celles qui possèdent des teneurs en vides très comparables, soit 5,4 % de vides pour l'EB de référence et 5,0 % pour l'EB avec verre. La Figure 5.3 présente les résultats expérimentaux (points) ainsi que les résultats modélisés (lignes discontinues) dans le plan Cole-Cole pour les deux essais analysés. À noter que les résultats des quatre essais sont présentés à l'ANNEXE V.

En observant l'allure des deux courbes, on remarque que l'EB incorporant des particules de verre semble avoir une valeur maximale d' E_2 supérieure à celle de l'EB de référence. Cette différence laisse sous-entendre que l'EB avec verre possède une composante visqueuse plus importante que l'EB de référence.

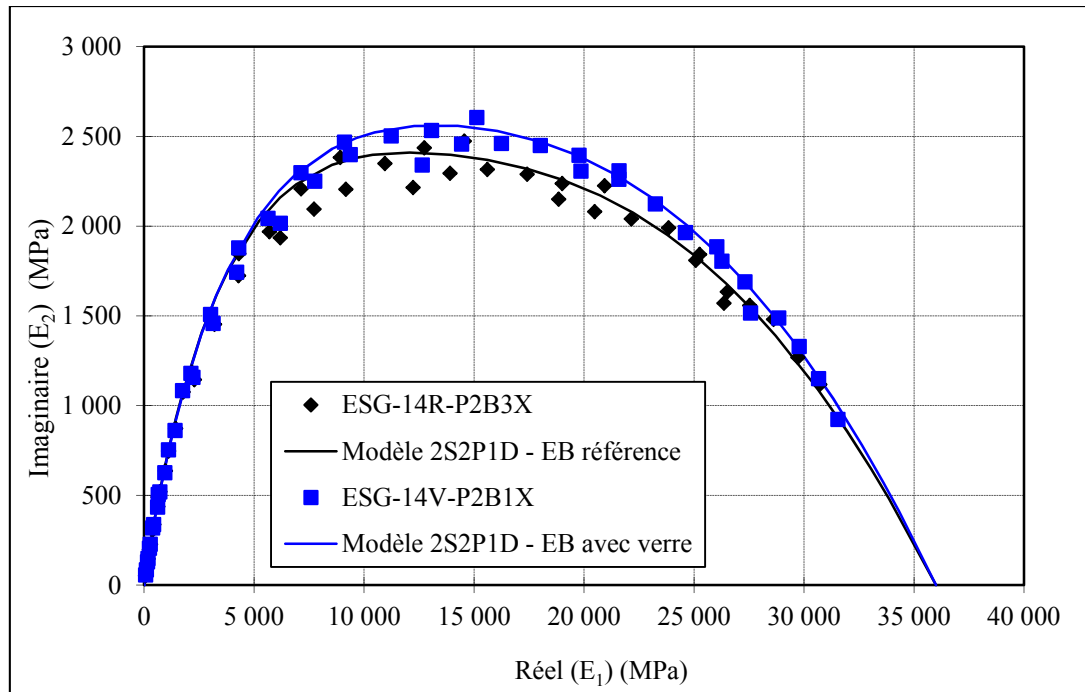


Figure 5.3 Résultats des essais de module complexe analysés dans le plan Cole-Cole

En ce qui concerne les valeurs de module vitreux (E_0) et de module statique (E_{00}), les résultats de la Figure 5.3 ne permettent pas d'observer de différence entre les deux EB. Par contre, les données du Tableau 4.14 montrent qu'il y a une légère diminution de la valeur du module vitreux pour l'EB incorporant des particules de verre, soit une moyenne de 36 500 MPa pour l'enrobé de référence et une valeur moyenne de 35 000 MPa pour l'enrobé incorporant des particules de verre. Cette diminution de module vitreux de l'EB avec verre par rapport à l'EB de référence laisse sous-entendre que l'EB avec verre présente un comportement plus visqueux que l'EB de référence. On peut ainsi croire que l'ajout de particules de verre modifie la rhéologie de l'EB car même en diminuant la quantité de bitume dans l'EB avec verre, les valeurs de rigidités sont semblables à l'EB de référence.

5.2.3 Analyse des courbes maîtresses

Les courbes maîtresses des éprouvettes selon une température de 10°C ESG-14R-P2B3X et ESG-14V-P2B1X ont été tracées à la Figure 5.4. Les résultats des deux EB semblent très similaires, mais on remarque une légère variation entre les valeurs de module statique (E_0).

Cette différence, malgré qu'elle soit très faible, signifierait que l'EB avec verre possède une matrice granulaire plus rigide. Or, comme le montrent les résultats du Tableau 4.14, la différence entre le module statique de l'EB de référence (25 MPa) et de l'EB avec verre (28 MPa) est de 3 MPa, ce qui est négligeable.

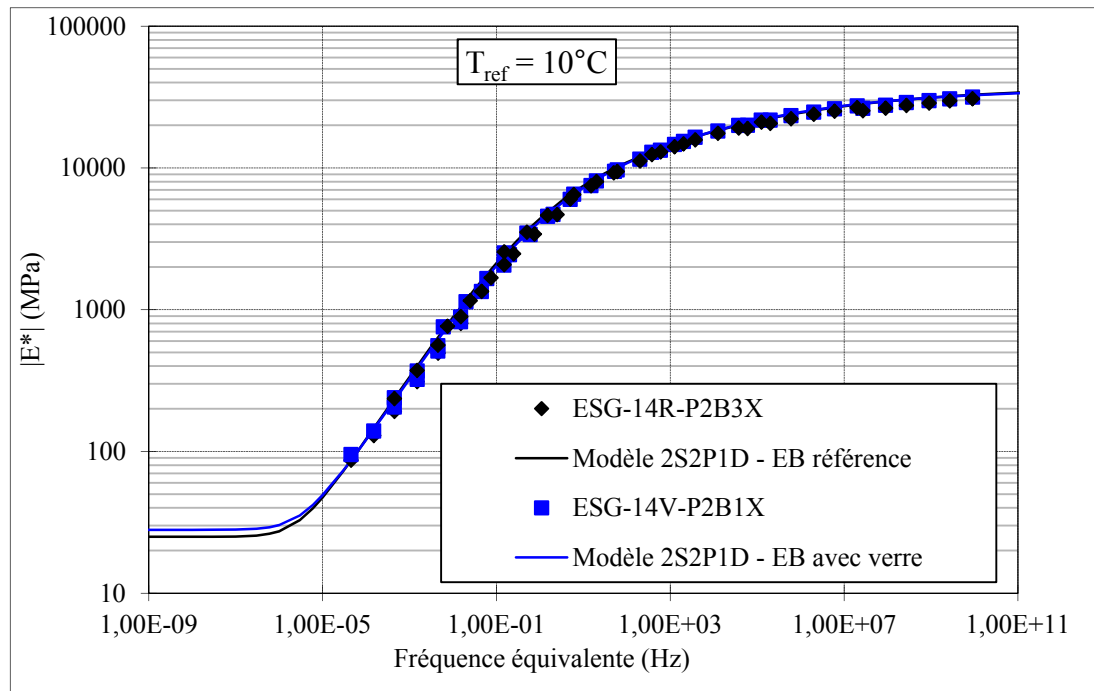


Figure 5.4 Courbes maîtresse ($T_{\text{ref}} = 10^{\circ}\text{C}$) des éprouvettes ESG-14R-P2B3X et ESG-14V-P2B1X

5.3 Essai de résistance à la fatigue

La fatigue d'un matériau est un endommagement progressif sous chargement cyclique répété qui mène à la rupture du matériau. Pour un EB, la fatigue se traduit par l'apparition de microfissures qui entraînent une diminution de la rigidité de l'EB. Les deux EB testés seront donc comparés sur la base de leur résistance à la fatigue en fonction des critères de rupture retenus. Pour chaque EB testé, un total de six éprouvettes ont été utilisées.

5.3.1 Analyse des résultats des essais de fatigue

L'ensemble des étapes présentées aux sections précédentes a pour but dans un premier temps de valider les résultats de l'essai de fatigue et dans un deuxième temps, de cerner la durée de vie de l'éprouvette testée. Le sommaire des résultats des essais de fatigue réalisés est présenté dans le Tableau 5.2 et le Tableau 5.3. Dans ce tableau on retrouve une synthèse des durées des vides des éprouvettes testés en fonction de l'amplitude de sollicitation selon les différents critères de rupture. De plus, on retrouve aussi les valeurs de module initial extrapolées et les valeurs de module initial obtenues avec le modèle 2S2P1D. Les essais où il y a eu rupture de l'éprouvette sont identifiés par un astérisque.

Dans un premier temps, on peut voir qu'il y a une différence notable entre les valeurs de module initial tirées du modèle 2S2P1D et les valeurs extrapolées des essais de fatigue. Pour un bitume, la présence de polymère a pour effet d'accentuer les effets biaisants tel que l'échauffement et la thixotropie liée à la perte de module du matériau (Touhara, 2012). Cette perte de module est très significative durant les premiers cycles de sollicitation telle qu'illustrée à la Figure 5.5. De plus, l'échauffement est d'autant plus significatif que l'amplitude de sollicitation est élevée (Di Benedetto et Corté, 2005). À titre d'exemple, les valeurs d'échauffement des éprouvettes de l'EB de référence ont été calculées pour les 300 premiers cycles. Pour une amplitude de déformation de 167 μdef , un échauffement de 0,01° a été noté tandis que pour une amplitude de déformation de 256 μdef , l'échauffement a été de 0,21°.

On peut ainsi croire que les valeurs élevées d'amplitudes utilisées ont accentué les effets biaisants et par le fait même, la perte rapide de module en début d'essai. La représentativité de l'extrapolation des valeurs de module initial en tenant compte des cycles 50 à 300 est donc affectée de façon négative.

Par la suite, on remarque que pour la majorité des essais réalisés, il n'y a aucune valeur de durée de vie associée au critère $N_{f\text{max}}$ ce qui veut dire qu'il n'y a jamais eu de valeur

maximale pour l'angle de phase. À cet effet, pour les essais où il n'y a pas de $N_{f\phi max}$ la valeur de $N_{f_{II/III}}$ correspond seulement à la valeur de $N_{f\Delta ext}$. Dans le cas contraire, la valeur de $N_{f_{II/III}}$ est associée à la valeur moyenne des durées de vie obtenues avec les critères $N_{f\Delta ext}$ et $N_{f\phi max}$.

À noter que la durée de vie correspondant à $N_{f_{II/III}}$ de l'éprouvette ESG-14R-P2B1 n'a pu être déterminé, car les écarts des extensomètres étaient stables et inférieurs à 25 % et que l'angle de phase n'avait jamais atteint de valeur maximale et ce, après plus de 8 000 000 de cycles. De plus, la durée de vie correspondant à $N_{f_{II/III}}$ de l'éprouvette ESG-14V-10-P2B2 n'a pas pu être déterminée, car l'écart d'un des extensomètres était déjà supérieur à 25 %, et ce, dès le début de l'essai.

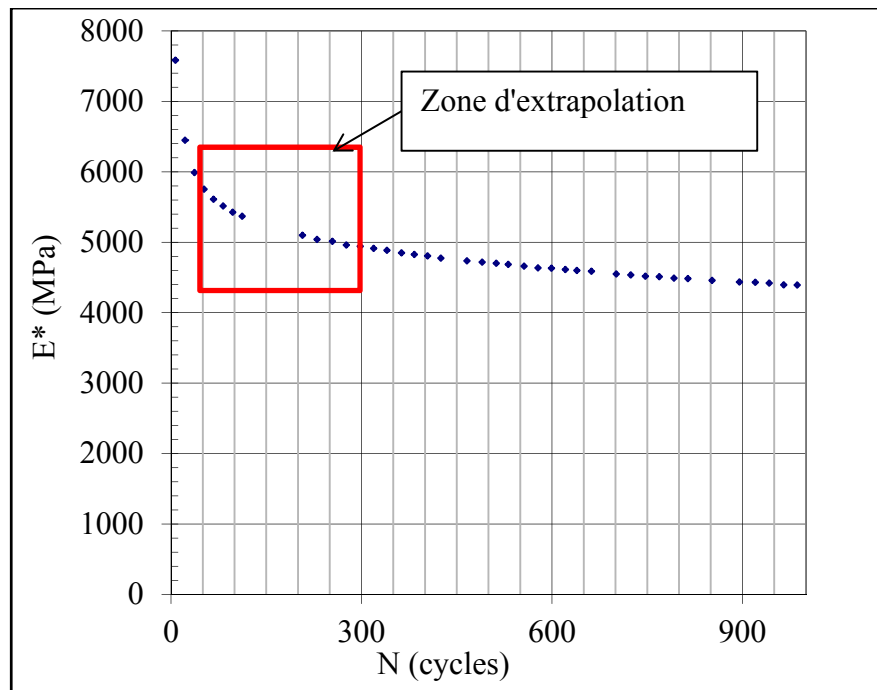


Figure 5.5 Perte de module dans les premiers cycles d'un essai de fatigue et zone d'extrapolation pour la valeur de module initial

Tableau 5.2 Sommaire des résultats des essais de fatigue pour l'EB de référence

Enrobé	Essai	% vides	$\epsilon_{\text{moy réel}} (\mu\text{def})$	Module initial (MPa)			$N_{f50\%}$	$N_{f\Delta\text{ext}}$	$N_{f\phi\text{max}}$	$N_{f_{II/III}}$
				$ E^* $	Moy.	2S2PID				
ESG-14R	P2B1	5,5	167,7	5 561	5 286	7 365	547 419	N/D	N/D	N/D
	P2B2	4,4	256,5	5 786			23 993	1 113 194	1 633 878	1 373 536
	P2B3	5,4	240,6	4 764			81 336	266 882	1 158 255	712 569
	P2C1	4,7	247,4	5 094			56 176	9 725 155	N/D	9 725 155
	P2C2*	5,0	232,8	5 356			46 119	542 386	N/D	542 386
	P2C3*	5,3	249,3	5 156			46 140	154 151	N/D	154 151

Tableau 5.3 Sommaire des résultats des essais de fatigue pour l'EB avec verre

Enrobé	Essai	% vides	$\epsilon_{\text{moy réel}} (\mu\text{def})$	Module initial (MPa)			$N_{f50\%}$	$N_{f\Delta\text{ext}}$	$N_{f\phi\text{max}}$	$N_{fII/III}$
				$ E^* $	Moy.	2S2P1D				
ESG-14V-10-B	P2B1	5,0	210,3	5 346	5 527	7 042	134 086	3 807 031	N/D	3 807 031
	P2B2	4,4	235,3	5 500			48 138	N/D	N/D	N/D
	P2B3	4,2	248,1	5 462			33 051	8 363 601	7 036 691	7 700 146
	P2C1	5,3	229,7	5 579			50 168	1 083 191	N/D	1 083 191
	P2C2*	4,8	238,6	5 289			37 060	171 660	N/D	171 660
	P2C3	5,0	251,5	5 983			22 989	239 437	N/D	239 437

5.3.2 Endommagement lors des essais de résistance à la fatigue

Lors d'un essai de laboratoire, pour un matériau viscoélastique l'endommagement se traduit par une perte de module de rigidité. Il est possible de calculer l'évolution du dommage d'une éprouvette d'EB en cours d'essai de fatigue en comparant la norme du module à un nombre de cycles donnés par rapport à la norme du module lors des premiers cycles avec l'équation (5.4. (Touhara, 2012))

$$D = 1 - \frac{|E^*(N)|}{|E_0^*|} \quad (5.4)$$

Où $|E_0^*|$ représente la norme du module complexe initial et $|E^*(N)|$ représente la norme du module complexe à un nombre de cycles donné.

La Figure 5.6 et la Figure 5.7 illustrent les courbes d'évolution du dommage pour l'ensemble des éprouvettes testées à différentes amplitudes de déformation. Les résultats montrent que l'évolution du dommage en fonction du nombre de cycles est presque linéaire et ce, peu importe l'amplitude de déformation. De même, une augmentation de l'amplitude de déformation entraîne une augmentation de la pente d'évolution du dommage ce qui traduit un endommagement plus rapide. Par contre, suivant les 100 000 premiers cycles, l'évolution du dommage des éprouvettes ESG-14R-P2C1 et ESG-14V-10-B-P2B3 semble être moins accentuée que les autres éprouvettes. Cette différence au niveau de la pente d'évolution du dommage pour ces deux éprouvettes pourrait être la cause des résultats de durées de vie très élevée (9 725 155 et 8 363 601 respectivement par rapport au critère $N_{f\Delta ext}$).

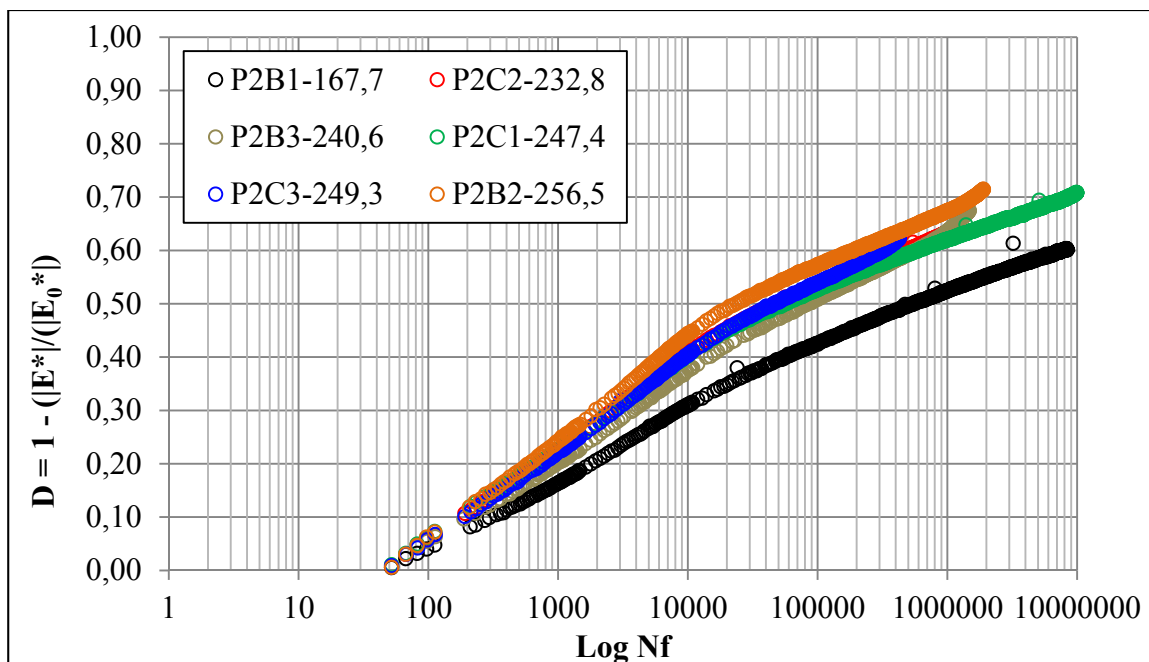


Figure 5.6 Évolution du dommage en fonction du nombre de cycles des essais de fatigue réalisés sur l'enrobé ESG-14R (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$)

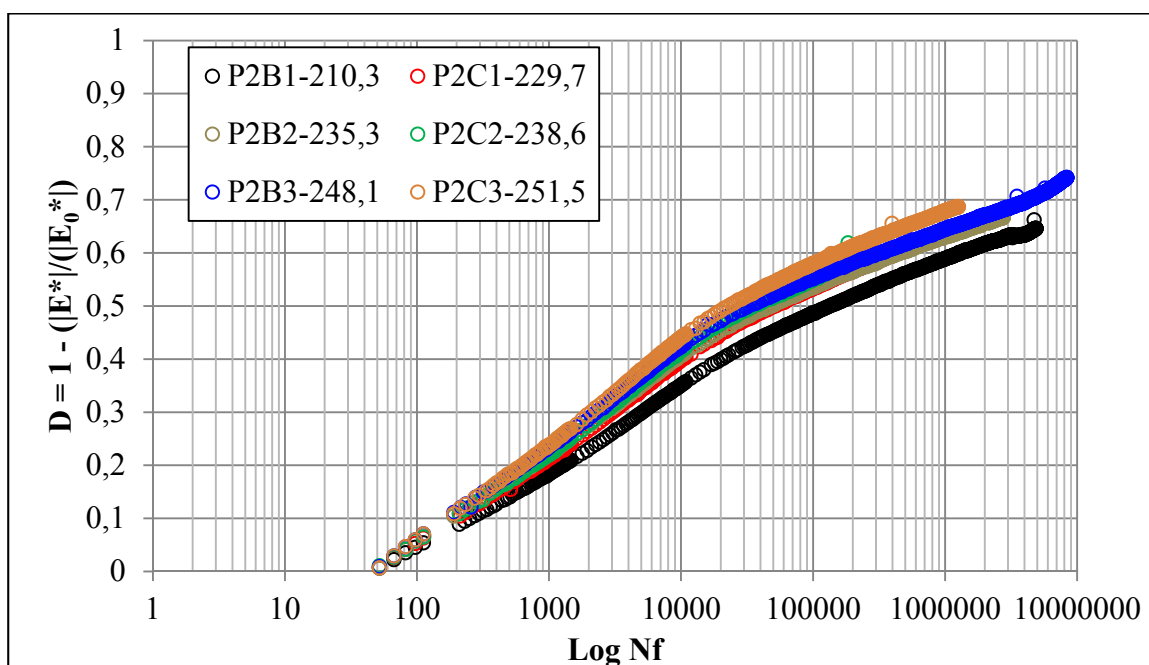


Figure 5.7 Évolution du dommage en fonction du nombre de cycles des essais de fatigue réalisés sur l'enrobé ESG-14V-10-B (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$)

5.3.3 Critères de rupture de fatigue

Comme il a été mentionné à la section 3.4.2.4, plusieurs critères de rupture permettent de déterminer la rupture de l'éprouvette et par le fait même, la rupture du matériau. Dans cette section, les différents critères de rupture seront présentés pour un seul essai de résistance à la fatigue, soit l'essai réalisé sur l'éprouvette ESG-14R-P2B2.

5.3.3.1 Critère de rupture classique ($Nf_{50\%}$)

Le critère de rupture classique correspond au nombre de cycles où la valeur de module correspond à 50 % de la valeur de module initial. La Figure 5.8 illustre la détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture classique pour l'éprouvette ESG-14R-P2B2. À noter que pour des raisons de présentation, le nombre de cycles présenté sur la figure a été réduit à 100 000.

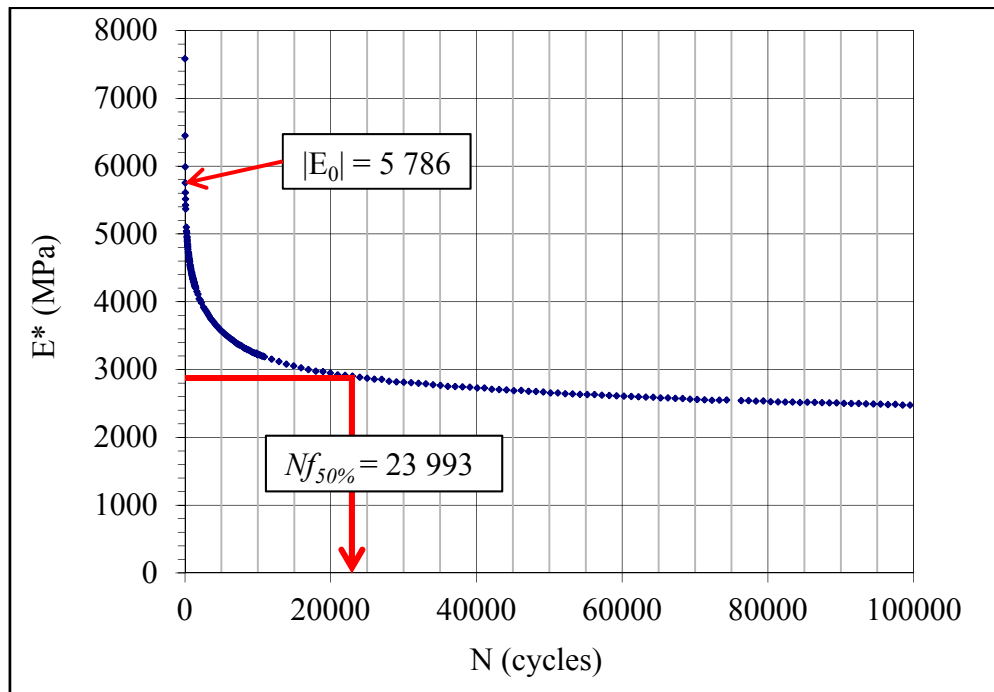


Figure 5.8 Exemple de détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture classique de l'éprouvette ESG-14R-P2B2 (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_a = 255\ \mu\text{def}$)

5.3.3.2 Critère de transition entre les phases II et III ($N_{f_{III}}$)

Comme il a été mentionné à la section 3.4.2.4, deux paramètres de l'essai sont étudiés pour permettre de déterminer la transition entre les phases II et III, soit le $N_{f_{\Delta ext}}$ et le $N_{f_{\phi}}$. La valeur de la durée de vie est définie comme étant la moyenne des durées de vie des deux critères.

La Figure 5.9 illustre la détermination du nombre de cycles associés à un écart de plus de 25 % pour un extensomètre. Dans le cadre de cet essai, c'est l'extensomètre #2 qui dépasse la valeur maximale de 25 % en premier. De plus, la Figure 5.10 illustre la détermination du nombre de cycles associés à la valeur maximale de l'angle de phase.

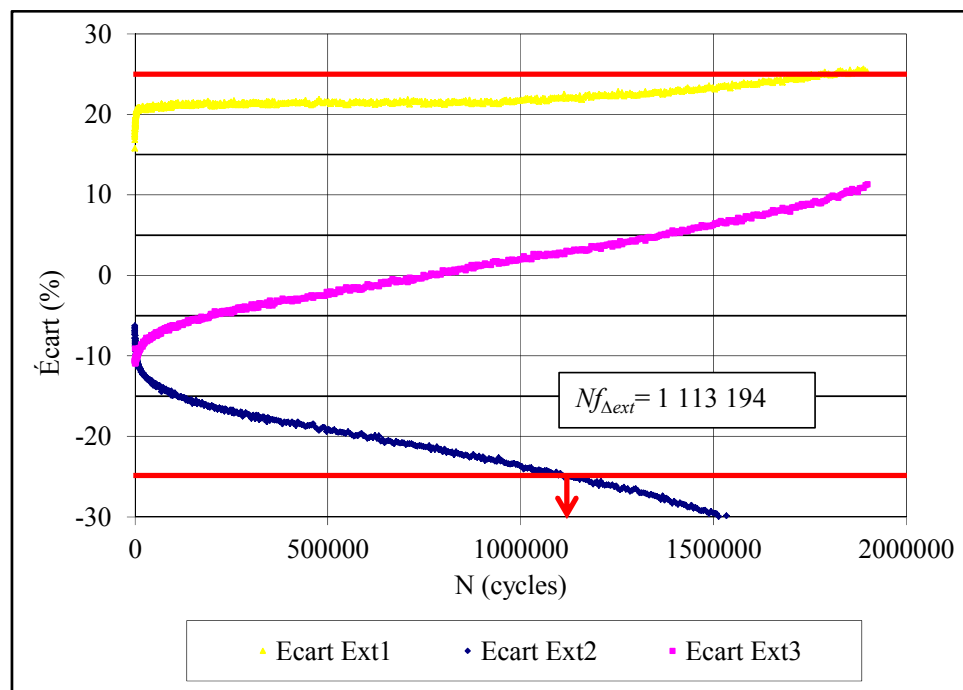


Figure 5.9 Exemple de détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture associé à l'écart moyen des extensomètres de l'éprouvette ESG-14R-P2B2 (ESG14 PG 64-34P; $T_{consigne} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_a = 255\text{ }\mu\text{def}$)

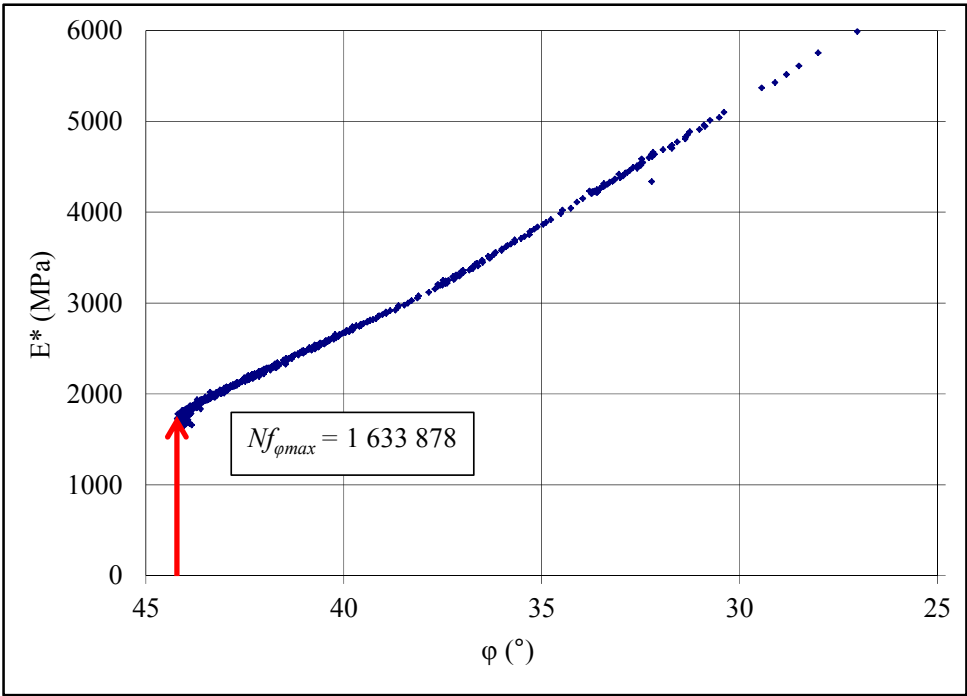


Figure 5.10 Exemple de détermination du nombre de cycles correspondant au critère de rupture associé à la valeur maximale de l'angle de phase ESG-14R-P2B2 (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_a = 255\text{ }\mu\text{def}$)

Le Tableau 5.4 présente le sommaire des durées de vie pour l'essai ESG-14R-P2B2. On peut voir qu'il y a une grande différence entre le critère $Nf_{50\%}$ et le critère $Nf_{II/III}$. Pour la suite du document, seulement les critères $Nf_{II/III}$ et $Nf_{50\%}$ seront utilisé pour tracer les droites de fatigue.

Tableau 5.4 Sommaire des durées de vie pour l'essai ESG-14R-P2B2 (ESG14 PG 64-34P; $T_{\text{consigne}} = 10^{\circ}\text{C}$; $Fr = 10\text{ Hz}$; $\epsilon_a = 255\text{ }\mu\text{def}$)

Critère de rupture	Durée de vie (cycles)
$Nf_{50\%}$	23 993
$Nf_{\Delta ext}$	1 113 194
$Nf_{\phi max}$	1 633 878
$Nf_{II/III} = \frac{N_{f\Delta ext} + N_{f\phi max}}{2}$	1 373 536

5.3.4 Relation entre les durées de vie et les amplitudes de déformation : droites de fatigue selon la loi de Wöhler

La détermination des coefficients c_1 et c_2 se fait en traçant la droite de fatigue obtenue par régression linéaire des résultats des essais réalisés représentés dans le domaine log-log. Le coefficient de détermination R^2 varie entre 0 et 1 permet de juger de la qualité de la régression linéaire. Une fois les paramètres c_1 et c_2 déterminés, il est possible de calculer la valeur d' ϵ_6 , laquelle représente l'amplitude de déformation qu'il conviendrait d'imposer pour une durée de vie d'un million de cycles. Le paramètre ϵ_6 est utilisé dans la méthode française de dimensionnement des chaussées bitumineuses et donne une indication quant à la performance en fatigue de l'enrobé : une valeur élevée traduit une meilleure performance en fatigue. Par ailleurs, la méthode française a recourt également au paramètre « b », lequel correspond à la pente de la relation $\log N_f - \log \epsilon_0$, c'est-à-dire l'inverse de celle liée à l'équation $b = -1/c_2$. La Figure 5.11 et la Figure 5.12 présentent la relation $\log N_f$ vs $\log \epsilon_0$. Le Tableau 5.5 présente la synthèse des caractéristiques des droites de fatigues. À noter que les éprouvettes ESG-14R-P2B1 (EB de référence) et ESG-14V-P2B2 (EB avec verre) n'ont pas été utilisés pour construire les droites de fatigue pour les raisons évoquées à la section 5.3.1. Au final, cinq résultats par EB ont été utilisés pour la construction des droites de fatigue.

Tableau 5.5 Caractéristiques des droites de fatigue ($T_{\text{consigne}} = 10^\circ\text{C}$; $Fr = 10 \text{ Hz}$)

Enrobé	Nombre d'essais	Critère	c_1	c_2	ϵ_6	b	R^2
ESG-14R	5	$Nf_{50\%}$	1,14E-21	7,10	208,0	-0,141	0,35
		$Nf_{III/III}$	4,08E+33	7,65	245,4	-0,131	0,03
ESG-14V-10-B	5	$Nf_{50\%}$	1,03E-29	9,27	161,5	-0,108	0,97
		$Nf_{III/III}$	1,41E-23	7,96	235,8	-0,126	0,12

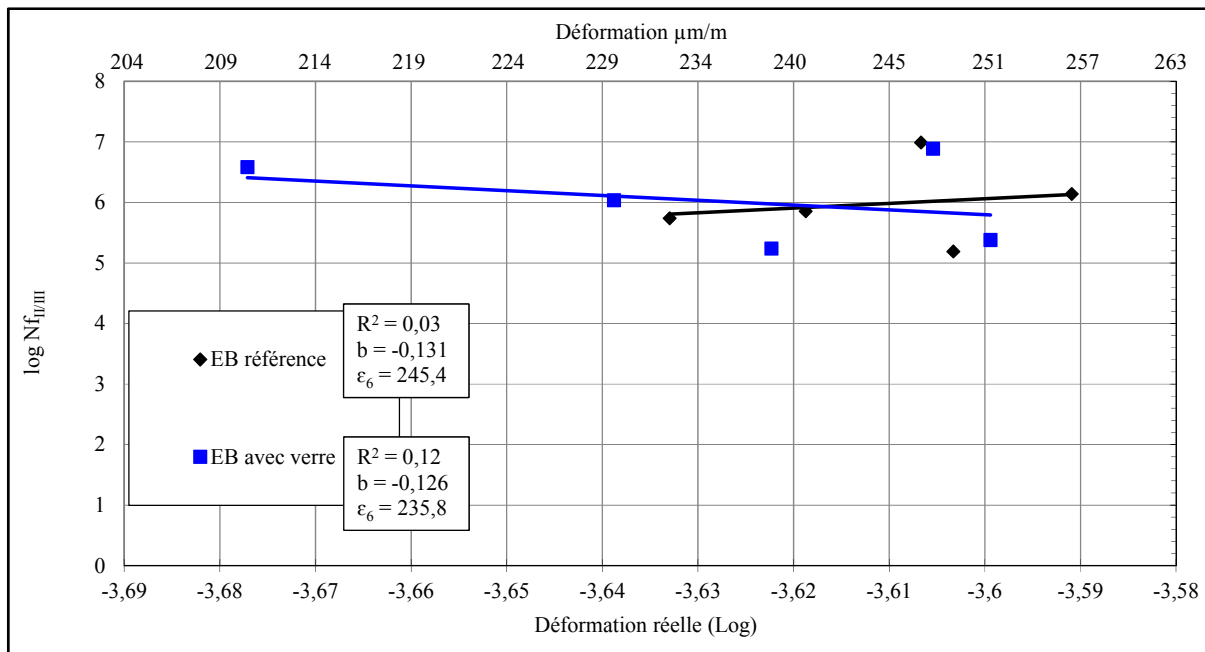


Figure 5.11 Droite de fatigue pour l'ESG-14R et l'ESG-14V-10-B selon le critère $Nf_{I/III}$ à 10°C et 10 Hz (PG 64-34P)

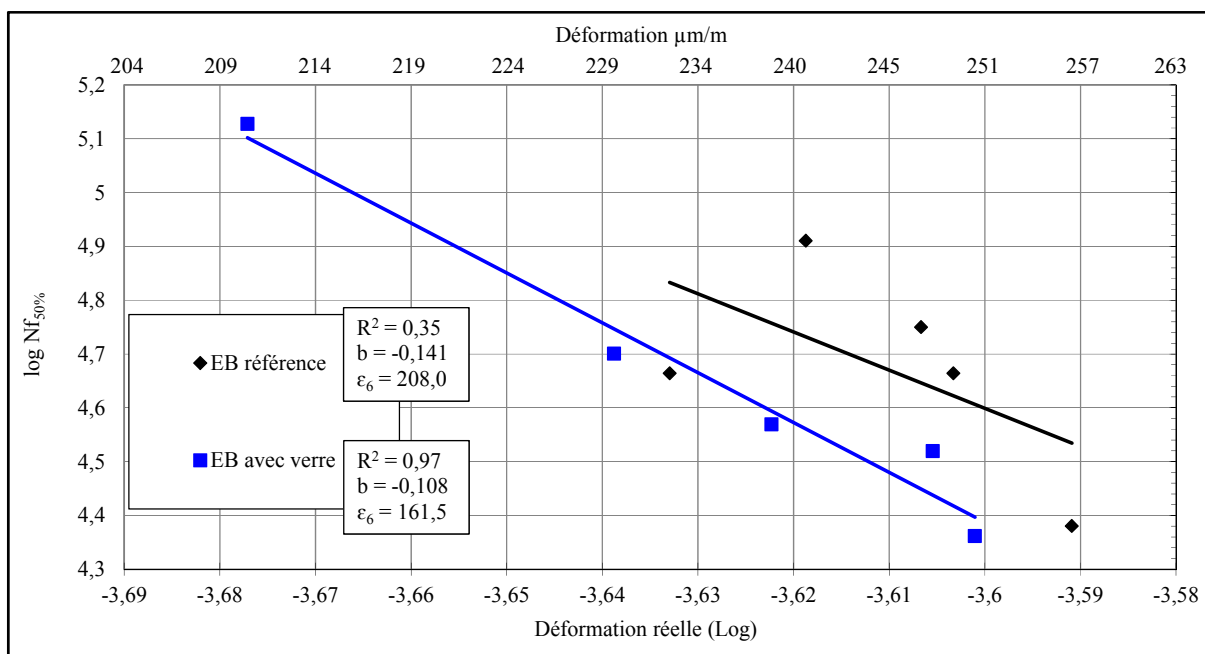


Figure 5.12 Droite de fatigue pour l'ESG-14R et l'ESG-14V-10-B selon le critère $Nf_{50\%}$ à 10°C et 10 Hz (PG 64-34P)

Dans un premier temps, en observant les paramètres des droites de fatigue des deux EB testés selon le critère $N_{f_{II/III}}$, on remarque que les valeurs de R^2 sont très faibles, ce qui veut dire que la qualité de la régression linéaire n'est pas très bonne. Pour les deux EB testés, on remarque aussi que certains essais semblent présenter des résultats atypiques. En effet, les essais ESG-14R-P2C1 et ESG-14V-10-B-P2B3 ont permis d'obtenir des durées de vie très élevées (supérieure à 8 000 000 de cycles) et ce, avec une amplitude de déformation élevée (supérieure à 240 $\mu\text{m/m}$). Ces résultats semblent très surprenants puisque les durées de vie de ces deux essais sont de loin supérieures aux résultats des autres essais. Comme il a été mentionné à la section 5.3.2, l'évolution du dommage pour ces deux essais semble s'atténuer en fonction du nombre de cycles, contrairement à tous les autres essais réalisés, ce qui pourrait être la cause de ces durées de vie très élevées.

En ce qui concerne les valeurs d' ϵ_6 , elles sont relativement élevées pour les deux enrobés testés, soit de 245,4 $\mu\text{m/m}$ et de 235,8 $\mu\text{m/m}$ respectivement pour les enrobés ESG-14R et ESG-14V-10-B, ce qui veut dire que l'EB de référence est plus résistant à la fatigue. Cette différence pourrait être en partie due au fait que l'ESG-14R contient une teneur en bitume plus élevée que l'ESG-14V-10-B. En effet, comme il a été relevé dans la revue de littérature, une teneur en bitume plus élevée améliore la résistance à la fatigue.

Pour ce qui est des droites de fatigue selon le critère $N_{f_{50\%}}$, on remarque que les valeurs de R^2 sont plus élevées que dans le cas du critère $N_{f_{II/III}}$. Par contre, les valeurs d' ϵ_6 obtenus de 208,0 $\mu\text{m/m}$ et de 161,5 $\mu\text{m/m}$ respectivement pour les enrobés ESG-14R et ESG-14V-10-B sont beaucoup plus faibles que dans le cas du critère $N_{f_{II/III}}$. On peut ainsi croire que ce critère de rupture sous-estime la performance face à la fatigue des EB. De plus, l'écart entre les valeurs d' ϵ_6 pour ce critère de rupture est beaucoup plus marqué que le critère $N_{f_{II/III}}$.

CONCLUSION

Le but premier de cette recherche était de vérifier la possibilité d'incorporer du verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux tout en conservant des caractéristiques équivalentes à un enrobé standard par la méthode de formulation LC du MTQ. La première étape fut de trouver un dosage optimal en particules de verre selon les exigences de la méthode de formulation LC (V_{be} et V_i à la PCG) ainsi que la résistance à l'orniérage. L'enrobé à l'étude était un ESG14 et cinq différents dosages en verre variant entre 5 % à 25 % ont été étudiés. Par la suite, un dosage optimal en particule de verre a été sélectionné et des ajustements ont été effectués par rapport à la teneur en bitume afin de répondre aux critères fixés par cette recherche. Enfin, la dernière étape du projet consistait à comparer les performances thermomécaniques, les caractéristiques physiques et la durabilité de l'enrobé avec dosage optimal en particules de verre avec un enrobé de référence. Pour cette dernière phase, les essais suivants ont été réalisés :

- résistance au retrait thermique empêché (TSRST);
- détermination du module complexe (E^*);
- résistance à la fatigue (FAT);
- évaluation de la macrotexture par hauteur de sable;
- mesure de l'adhérence au pendule SRT;
- tenue à l'eau.

Après l'analyse des résultats de la première phase, il a été observé que l'incorporation de verre dans un enrobé permettait de diminuer le volume de bitume absorbé et par le fait même, la teneur en bitume d'ajout pour un volume de bitume effectif fixe. De plus, l'utilisation de verre semble augmenter la malléabilité de l'enrobé et faciliter la mise en place puisque les vides à 10 girations pour tous les enrobés avec verre sont inférieurs à l'enrobé de référence. Par contre, l'ajout de verre selon les dosages de 10 % et 20 % diminue de façon importante la résistance à l'orniérage de l'enrobé. Suite à l'analyse de ces résultats, il a été choisi de mettre l'accent sur la performance à l'orniérage pour sélectionner le dosage

optimal. À cet effet, le dosage optimal a été fixé à 10 %, mais la teneur en bitume d'ajout a été diminuée afin d'obtenir un enrobé avec des performances à l'orniérage respectant les exigences.

L'ajout de verre dans les enrobés ne semble pas avoir d'impact sur les performances thermomécaniques. En effet, les résultats de TSRST, de module complexe et de résistance à la fatigue sont comparables. Les différences obtenues au niveau des résultats semblent être dues à la différence de teneur en bitume entre les deux enrobés. De plus, l'ajout de verre selon la méthode utilisée dans cette recherche ne modifie pas les caractéristiques physiques, soit la macro texture ainsi que l'adhérence de l'enrobé. Par contre, l'utilisation de verre semble diminuer la durabilité de l'enrobé, soit la tenue à l'eau.

En conclusion, cette recherche a servi d'étude exploratoire sur la possibilité d'utiliser du verre de post-consommation dans les enrobés bitumineux. Les résultats semblent prometteurs, mais plusieurs aspects méritent d'être étudiés plus en profondeur afin de mieux comprendre le comportement du verre dans les enrobés. Entre autres, les résultats obtenus lors de l'étude des caractéristiques volumétriques sont très intéressants et nécessitent une attention particulière. Une étude approfondie de l'impact de la forme et de la dimension des particules de verre sur les caractéristiques volumétriques, l'aptitude au compactage ainsi que la résistance à l'orniérage serait intéressante et permettrait peut-être d'expliquer les résultats obtenus. Le volume des pores ainsi que la dimension de l'ouverture des pores des particules de verre sont-ils très différents des granulats conventionnels ce qui expliquerait la différence d'absorption? As-t'il présence de constituants chimiques à la surface des granulats de verre ce qui fait en sorte de repousser le bitume? Qu'en est-il de l'adhérence entre le bitume et les particules de verre? À cet effet, il serait judicieux de concentrer les efforts sur le phénomène d'orniérage et de sensibilité à l'eau accrue des enrobés avec particules de verre pour bien comprendre les mécanismes qui influencent ces paramètres. Bref, plusieurs éléments concernant les particules de verre méritent d'être étudiés plus en profondeur afin d'éventuellement utiliser du verre de post-consommation dans les enrobés du Québec.

ANNEXE I

FORMULE DE L'ENROBÉ DE RÉFÉRENCE ESG14

ANNEXE II

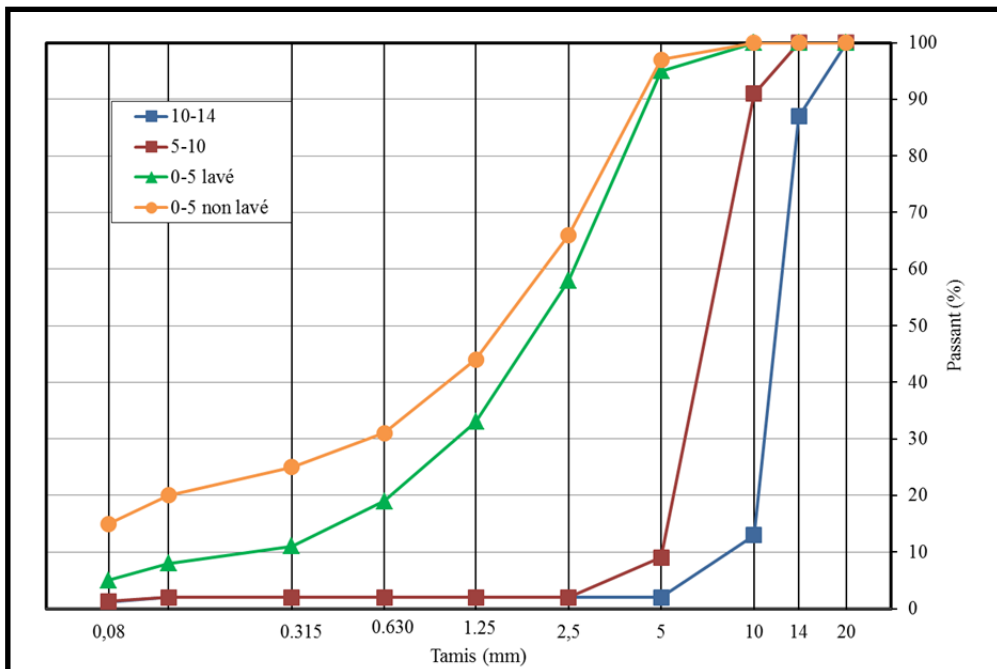
FORMULE DE L'ENROBÉ ESG-14V-10-B

ANNEXE III

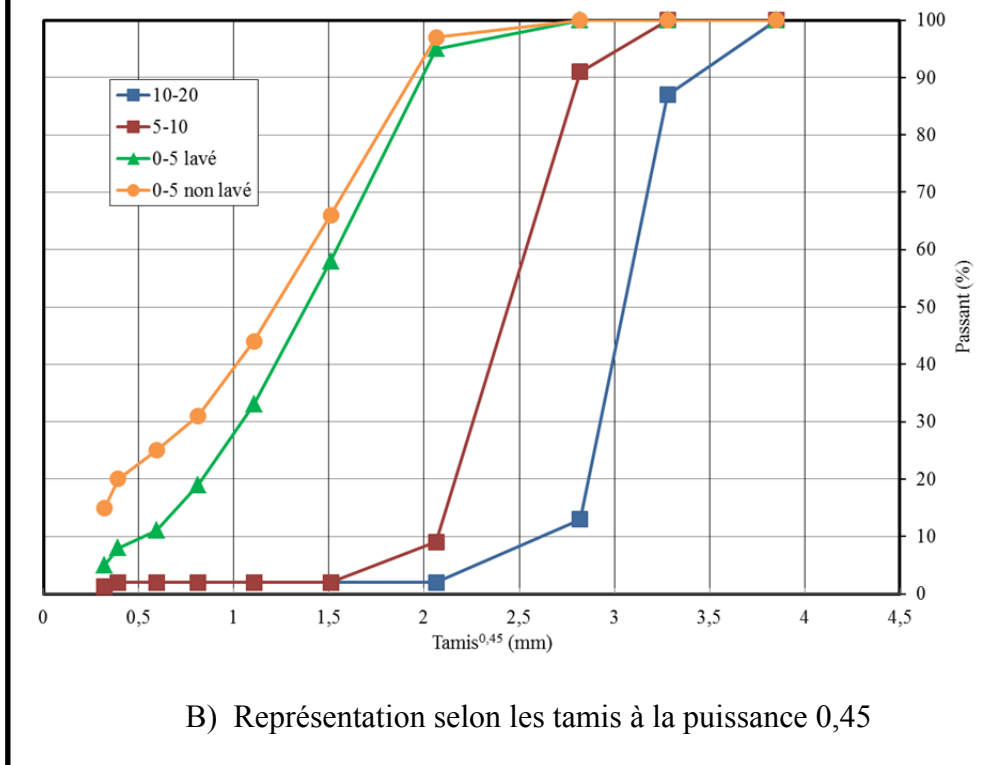
ATTESTATION DE CONFORMITÉ DU BITUME

ANNEXE IV

COURBE GRANULOMÉTRIQUE DES DIFFÉRENTS CONSTITUANTS

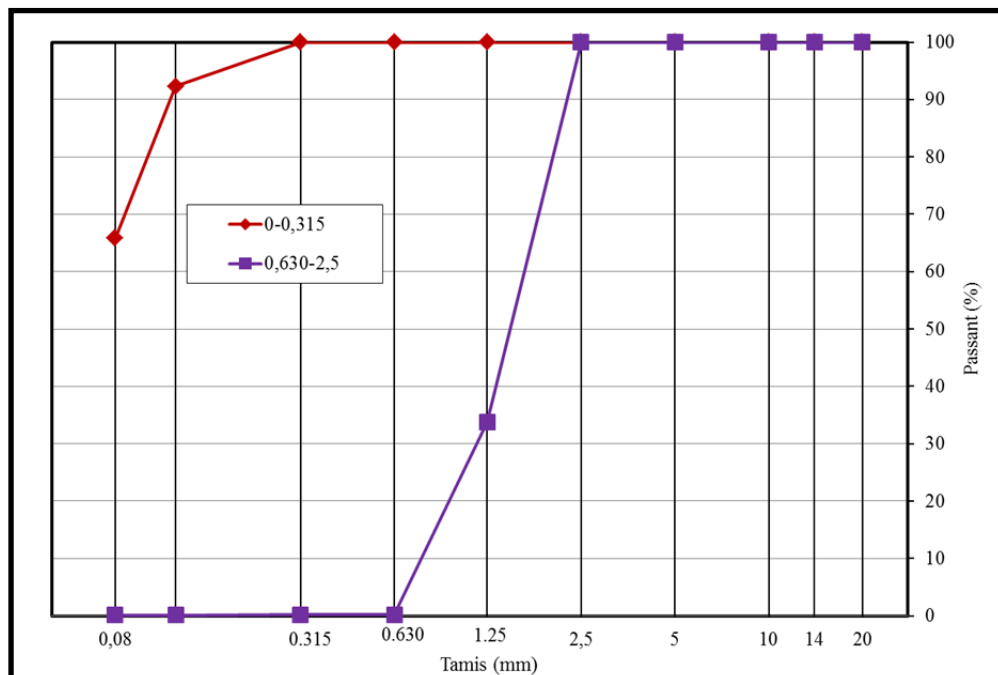


A) Représentation classique

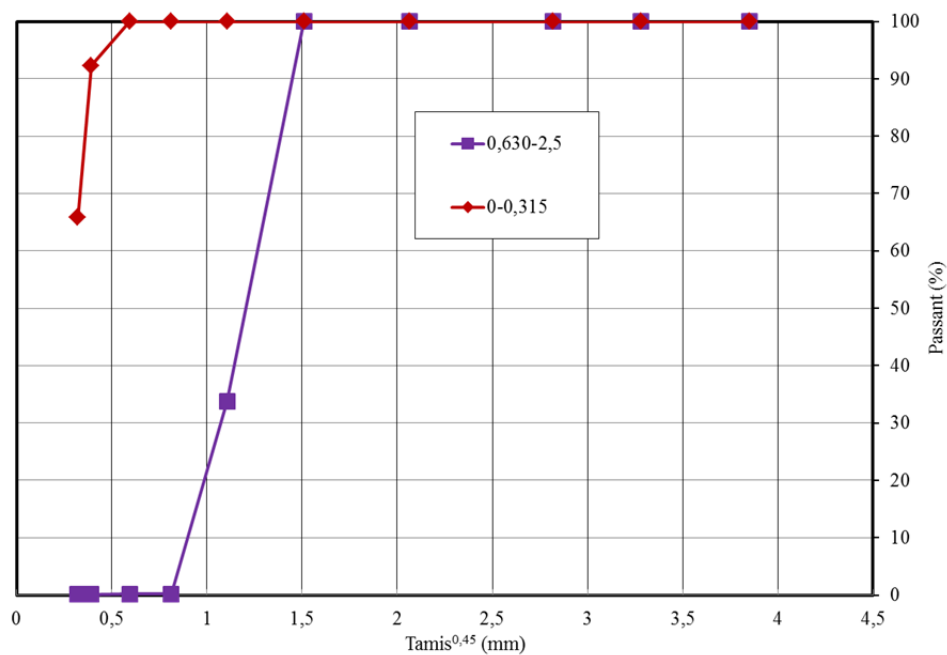


B) Représentation selon les tamis à la puissance 0,45

Figure-A IV-1 Granulométrie des différentes classes granulaires utilisées en fonction des tamis à la puissance 0,45



A) Représentation classique



B) Représentation selon les tamis à la puissance 0,45

Figure-A IV-2 Granulométrie des différents grades de verre utilisés

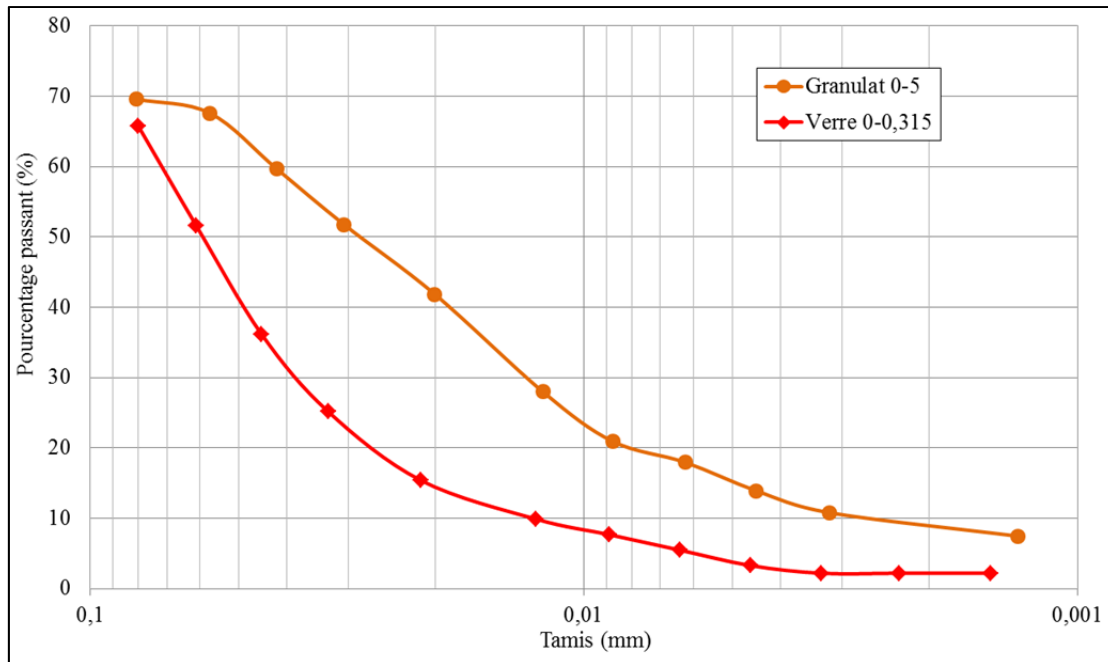


Figure-A IV-3 Granulométrie du passant au tamis 0,080 mm du granulat 0-5 et du verre 0-0,315

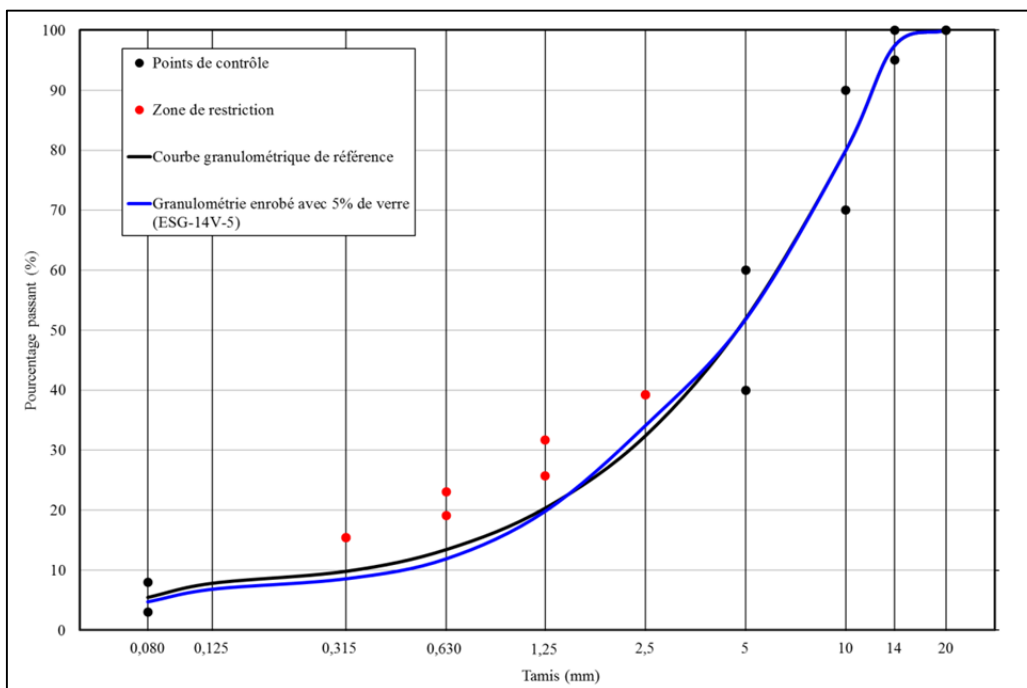


Figure-A IV-4 Courbe granulométrique de l'enrobé avec 5 % de verre par rapport à l'enrobé de référence

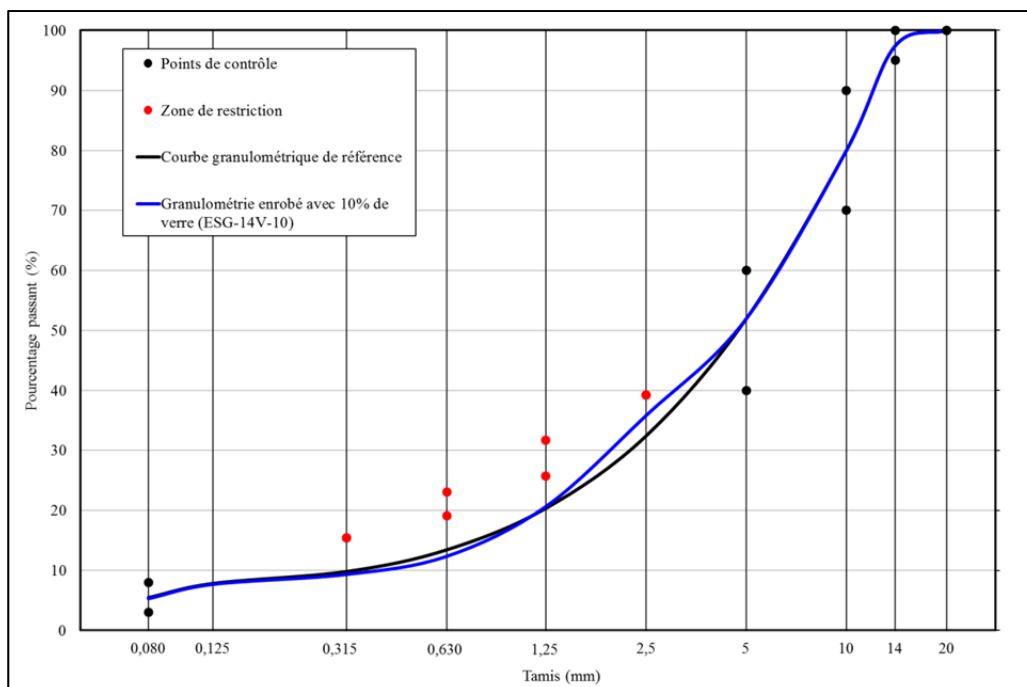


Figure-A IV-5 Courbe granulométrique de l'enrobé avec 10 % de verre par rapport à l'enrobé de référence

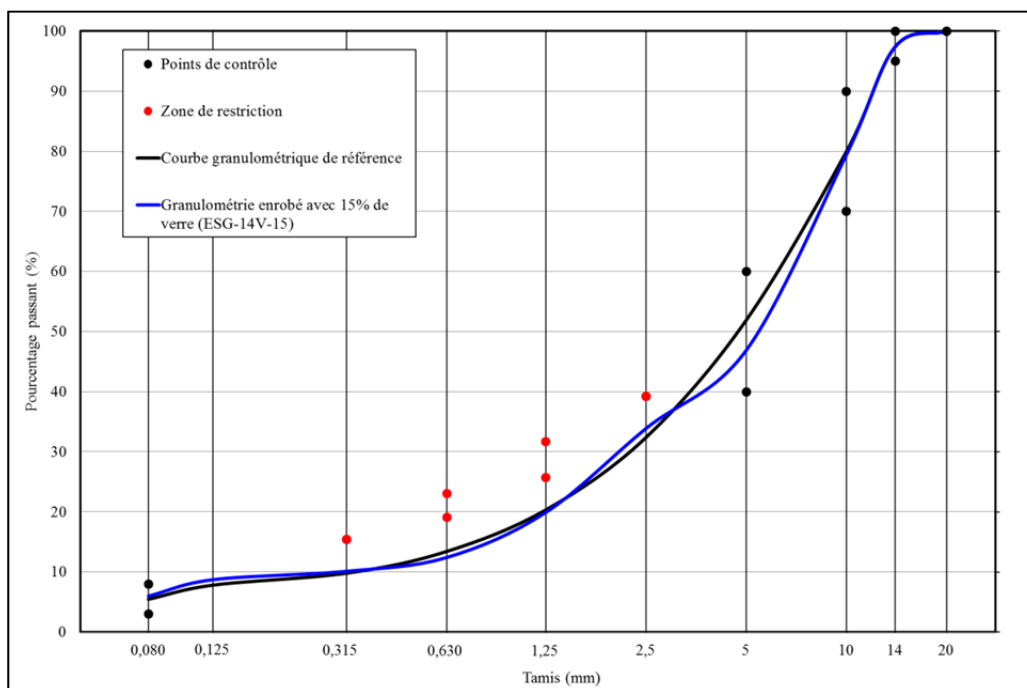


Figure-A IV-6 Courbe granulométrique de l'enrobé avec 15 % de verre par rapport à l'enrobé de référence

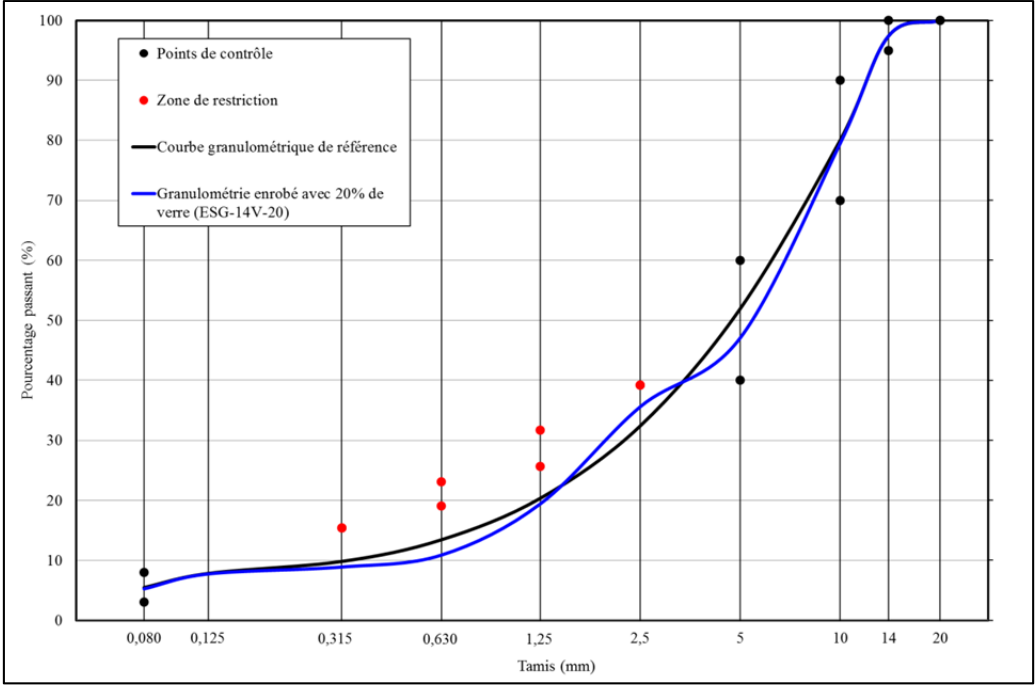


Figure-A IV-7 Courbe granulométrique de l'enrobé avec 20 % de verre par rapport à l'enrobé de référence

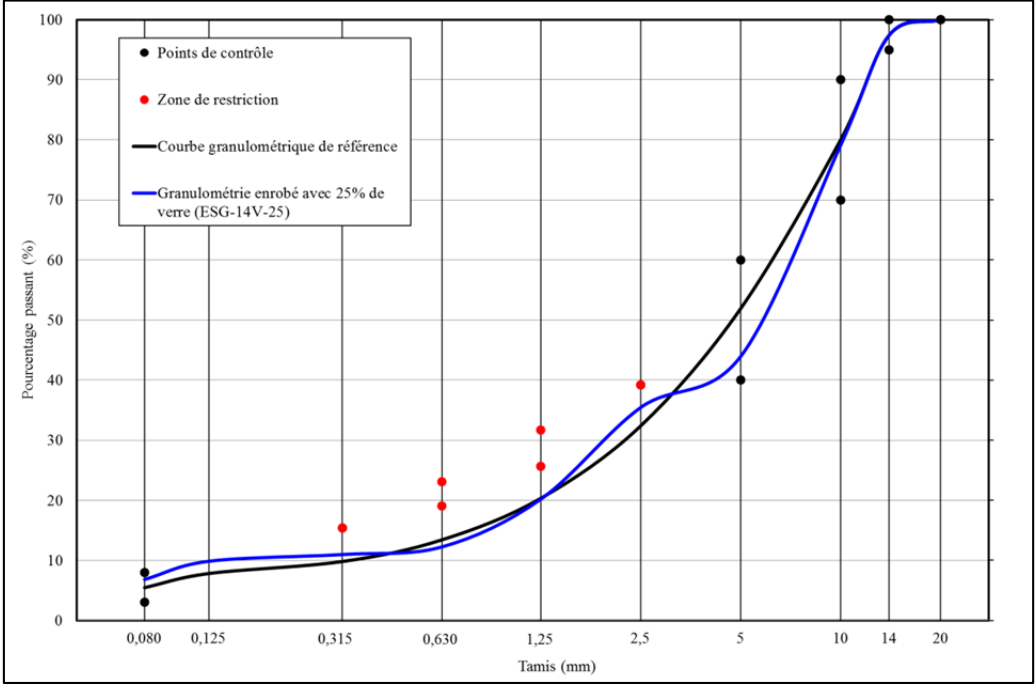


Figure-A IV-8 Courbe granulométrique de l'enrobé avec 25 % de verre par rapport à l'enrobé de référence

ANNEXE V

RÉSULTATS DES ESSAIS DE MODULE COMPLEXE

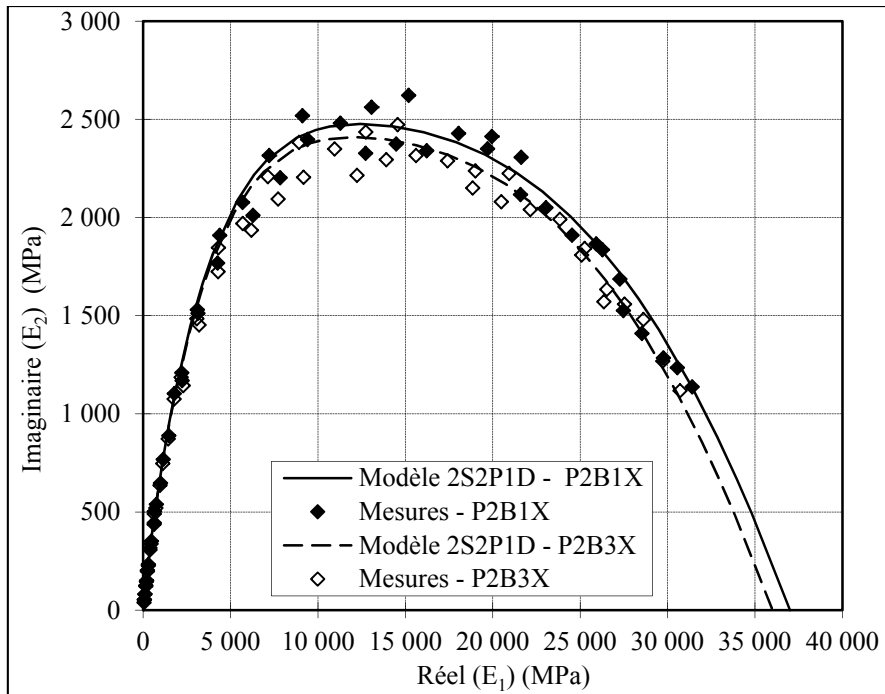


Figure-A V-1 Résultats des essais de module complexe dans le plan Cole-Cole pour l'EB de référence

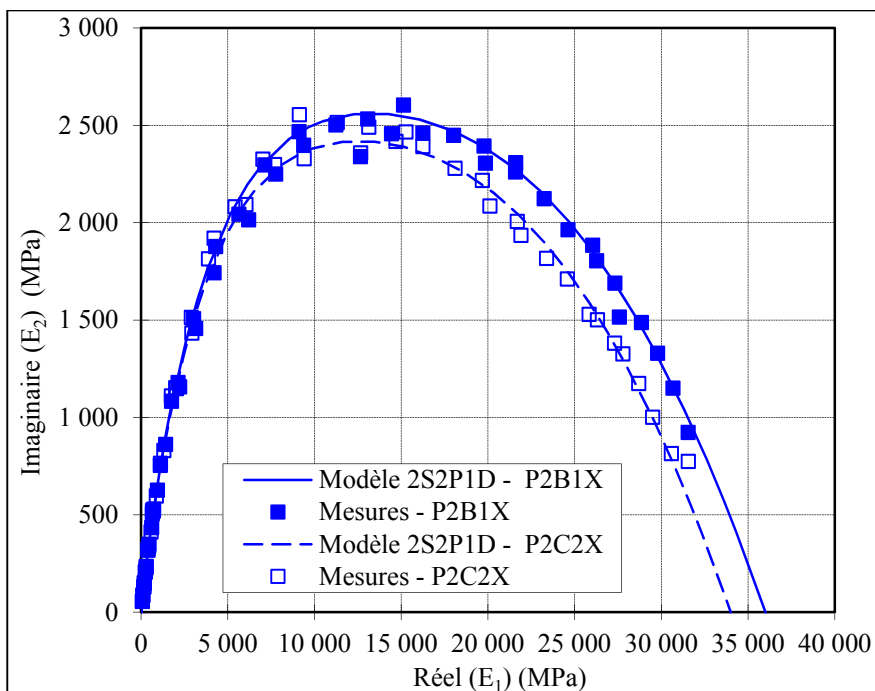


Figure-A V-2 Résultats des essais de module complexe dans le plan Cole-Cole pour l'EB avec 10 % de verre

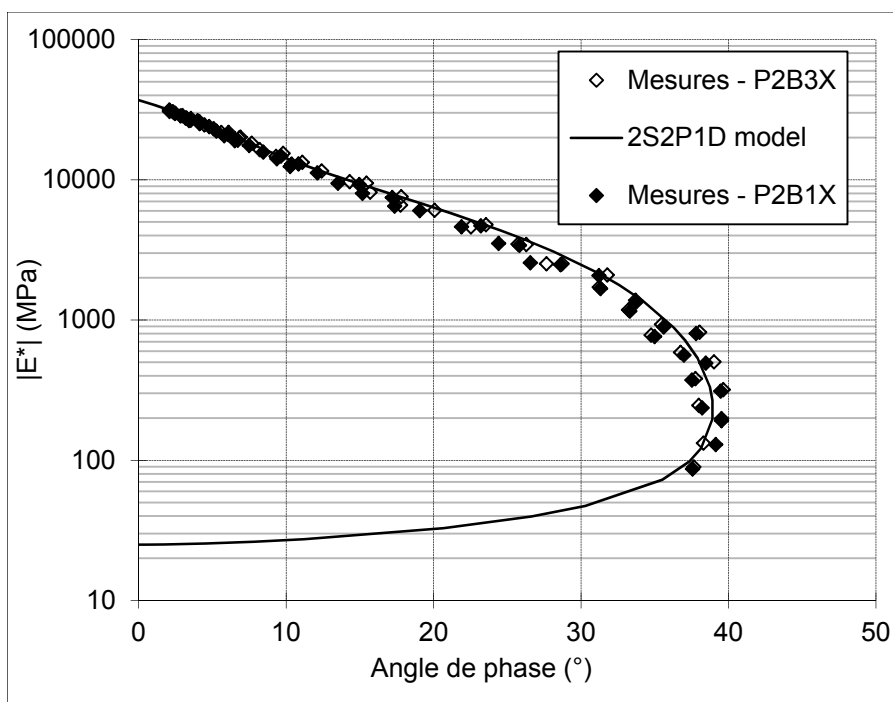


Figure-A V- 3 Résultats des essais de module complexe dans l'espace de Black pour l'EB de référence

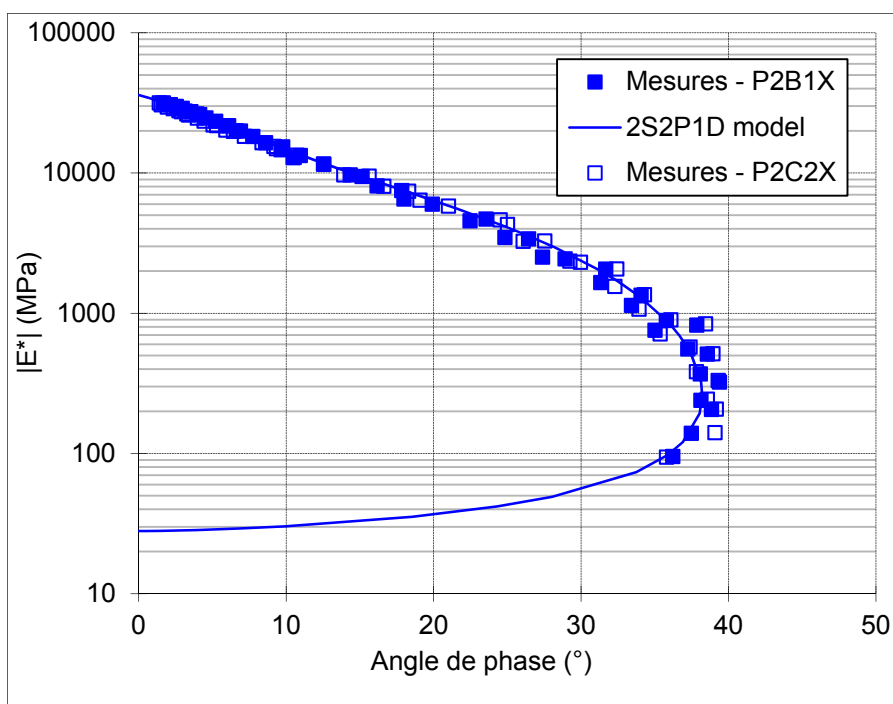


Figure-A V- 4 Résultats des essais de module complexe dans l'espace de Black pour l'EB avec 10 % de verre

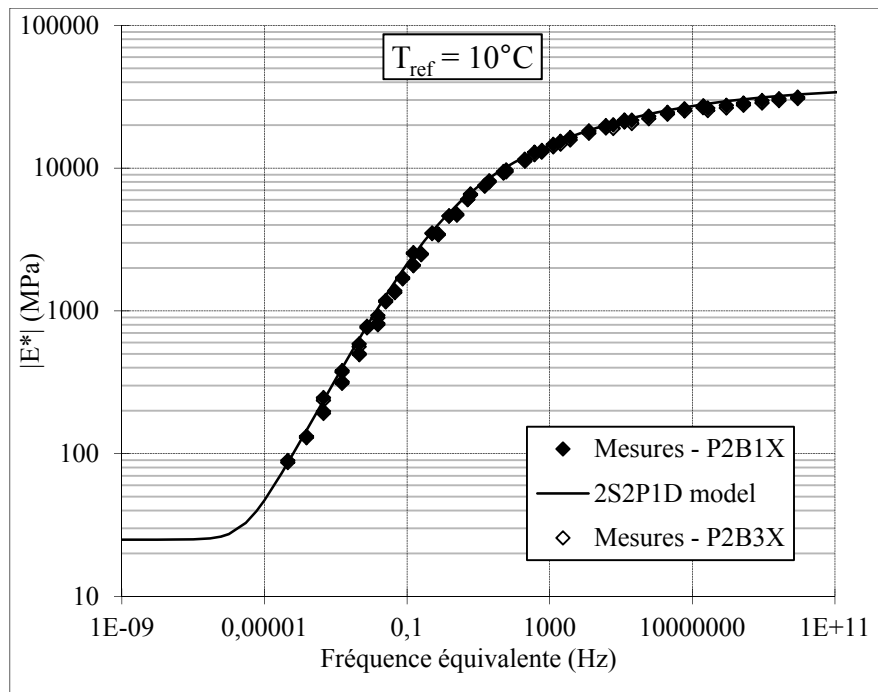


Figure-A V- 5 Courbe maîtresse des essais de module complexe $|E^*|$ pour l'EB de référence ($T_{ref} = 10^\circ\text{C}$)

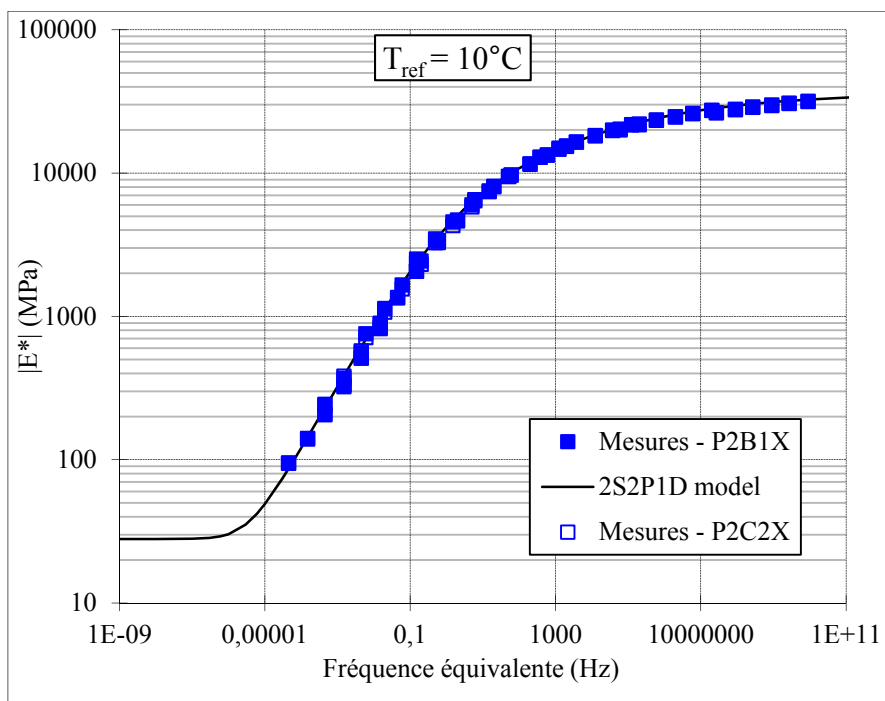


Figure-A V- 6 Courbe maîtresse des essais de module complexe $|E^*|$ pour l'EB avec 10 % de verre ($T_{ref} = 10^\circ\text{C}$)

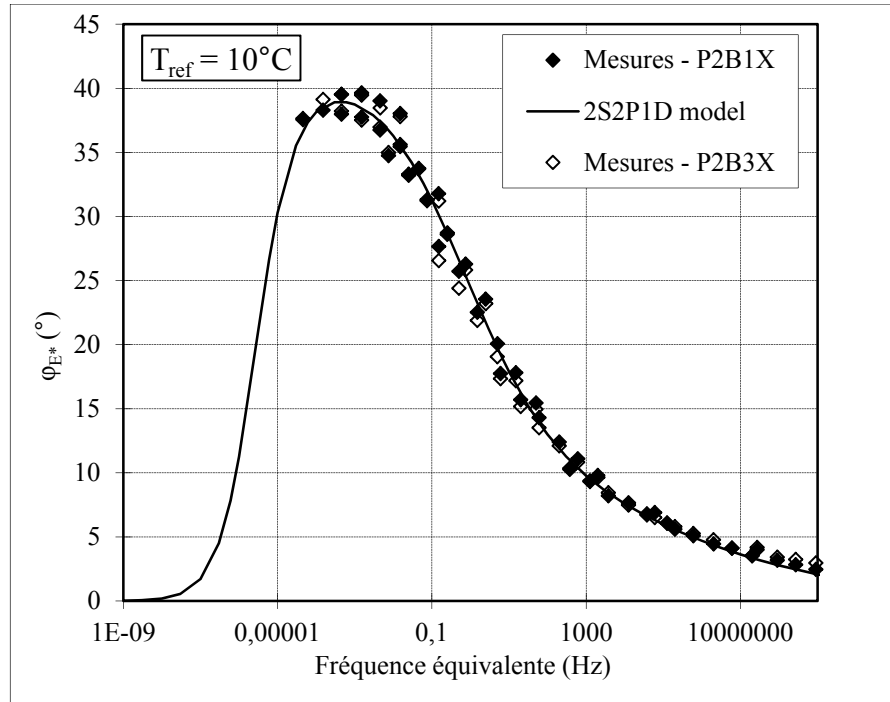


Figure-A V- 7 Courbe maîtresse des essais de module complexe $|\phi_{E^*}|$ pour l'EB de référence ($T_{ref} = 10^\circ\text{C}$)

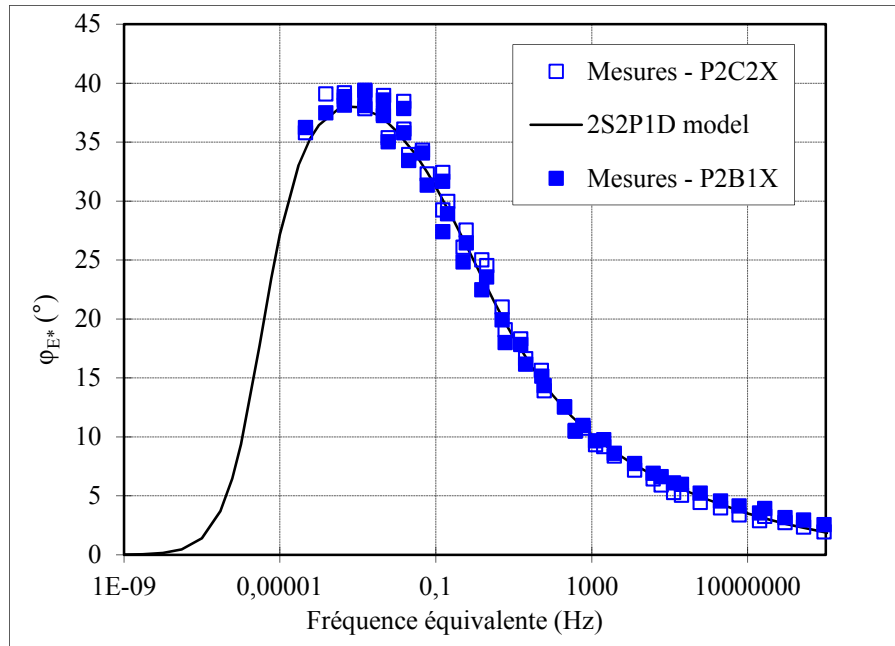


Figure-A V- 8 Courbe maîtresse des essais de module complexe $|\phi_{E^*}|$ pour l'EB avec 10 % de verre ($T_{ref} = 10^\circ\text{C}$)

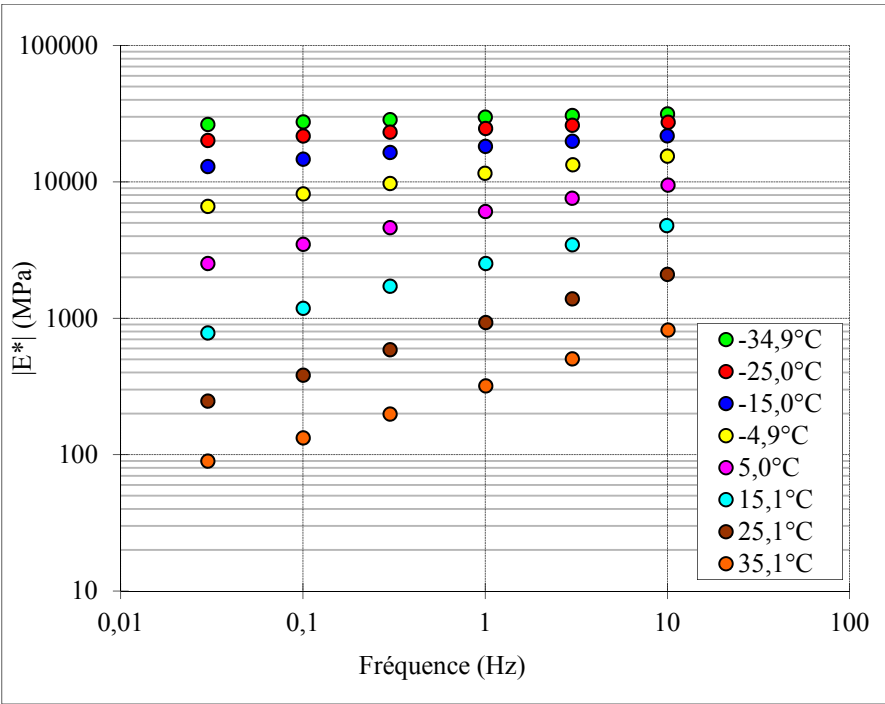


Figure-A V- 9 Courbes isotherme de l'essai ESG-14R-P2B1X

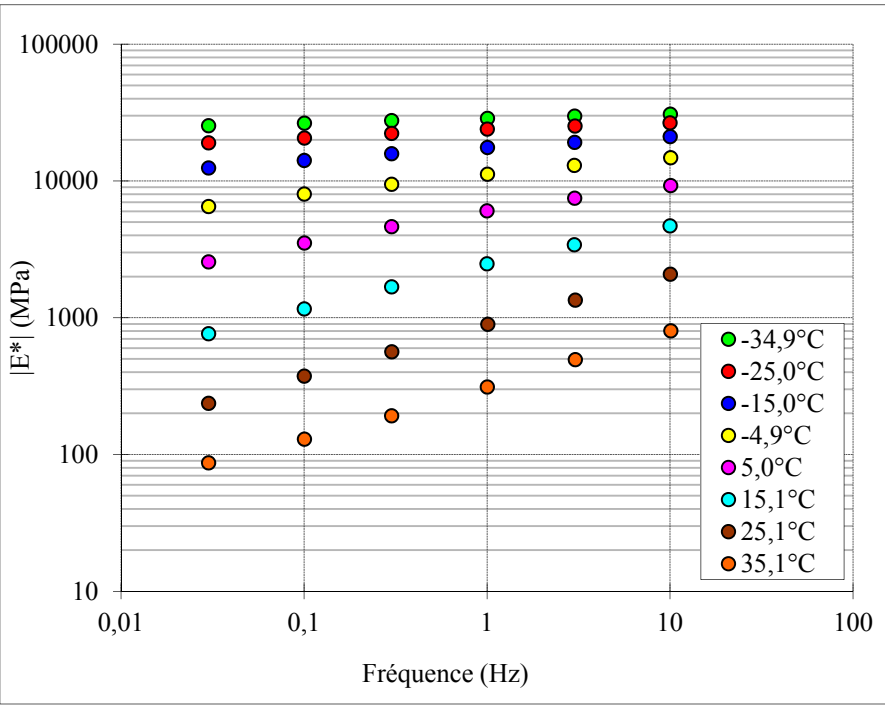


Figure-A V- 10 Courbes isotherme de l'essai ESG-14R-P2B3X

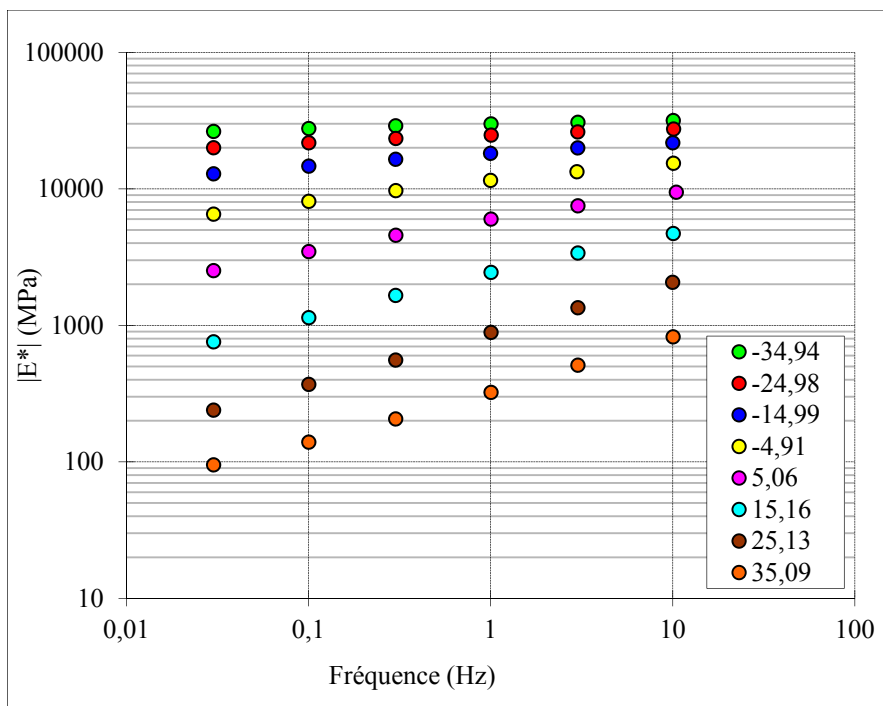


Figure-A V- 11 Courbes isothermes de l'essai ESG-14V-P2B1X

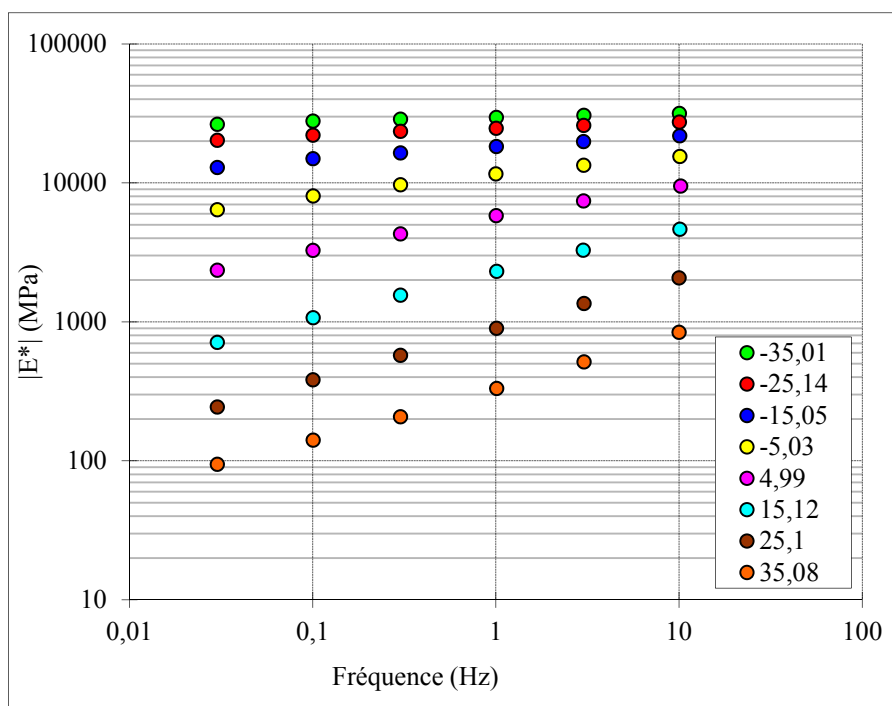


Figure-A V- 12 Courbes isothermes de l'essai ESG-14V-P2C2X

ANNEXE VI

RÉSULTATS DES ESSAIS DE FATIGUE

BIBLIOGRAPHIE

- Airey, G.D., A.C. Collop et N.H. Thom. 2004. « Mechanical Performance of Asphalt Mixtures incorporation Slag and Glass Secondary Aggregates ». In *8th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa*. (Sun City South Africa, 12-16 September 2004), p. 13. Nottingham Centre for Pavement Engineering.
- Arabani, M. 2011. « Effect of glass cullet on the improvement of the dynamic behaviour of asphalt concrete ». *Construction and Building Materials*, vol. 25, n° 3, p. 1181-1185.
- Arabani, M., S. M. Mirabdolazimi et B. Ferdowsi. 2012. « Modeling the fatigue behaviors of glasphalt mixtures ». *Scientia Iranica*. Vol. 19, n° 3, p. 341-345. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.scient.2012.02.021> >. Consulté le 24 Janvier 2013.
- Baaj, Hassan. 2002. « Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés ». Thèse de doctorat. Institut national des sciences appliquées de Lyon, 264 p.
- Bitume Québec. 2008. *Guide de bonnes pratiques - La mise en oeuvre des enrobés*. En Ligne, 114 p. < http://www.bitumequebec.ca/assets/application/publications/c74c97c89a90256_file.pdf >. Consulté le 8 Mai 2013.
- Carter, Alan. 2002. « Rhéologie en petites déformations des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction. Montréal, École de Technologie Supérieure, 234 p.
- Carter, Alan, et Daniel Perraton. 2002. « La mesure du module complexe des enrobés bitumineux ». In *2e Conférence spécialisée en génie des matériaux de la Société canadienne de génie civil*. (Montréal, Québec, 5-8 juin 2002), p. 10. Société canadienne de génie civil.
- Day, DE, et R Schaffer. 1989. *Glasphalt Paving Handbook*. University of Missouri-Rolla, 55 p.
- Dembickl, Matthew. 1992. « Glasphalt Paves an Alternate Route ». *Waste Age Magazine*. En Ligne. Vol. 23, n° 11, p. 87-92. < <http://infohouse.p2ric.org/ref/02/01491.pdf> >. Consulté le 10 Décembre 2012.
- Di Benedetto, Hervé , et Jean-François Corté. 2004. *Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants*, 1ère éd. Coll. « Mécanique et Ingénierie des Matériaux ». Paris: Hermes Science, 234 p.

- Di Benedetto, Hervé , et Jean-François Corté. 2005. *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges*, 1ère éd. Coll. « Mécanique et Ingénierie des Matériaux ». Paris: Hermes Science, 283 p.
- F. Parker, et E.R. Brown. 1991. « Effects of aggregate properties on flexible pavement rutting in Alabama ». In *Transportation Research Board 70th Annual Meeting*. p. 40.
- Faure, Michel. 1998. *Routes : Tome 2*, 1ère éd. Coll. « Les Cours de l'ENTPE ». Lyon: Aléas, 255 p.
- Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation. À jour au 23 Avril 2012. *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction : Waste Glass*. En Ligne. < <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/97148/068.cfm> >. Consulté le 4 Avril 2013.
- G. W. Maupin, Jr. 1998. *Final Report - Effect of glass concentration on stripping of glasphalt*.
- Gagné, Louis. 2010. « Le Verre : Fiches informatives ». En Ligne, 8 p. < <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/Upload/Publications/Fiche-verre.pdf> >. Consulté le 11 Janvier 2013.
- Hughes, Charles S. 1990. *Feasibility of Using Recycled Glass in Asphalt*. VTRC 90-R3. Richmond: Commonwealth of Virginia, 32 p.
- Imteaz, Monzur Alam, Mm Younus Ali et Arul Arulrajah. 2012. « Possible environmental impacts of recycled glass used as a pavement base material ». *Waste Management and Research*. Vol. 30, n° 9, p. 917-921. < <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X12448512> >. Consulté le 28 Février 2013.
- Kandhal, Prithvi S. 1992. *Waste Materials in Hot Mix Asphalt: An Overview*. NCAT Report No. 92-6. Auburn University, Alabama: National Center for Asphalt Technology, 18 p.
- Konrad, Jean-Marie, et Fabian Alonso Valencia Gabezas. 2008. *Caractérisation des particules fines d'un matériau granulaire de fondation par l'essai au bleu de méthylène*. GCT-2008-01. Québec: Université Laval, 99 p.
- Lamothe, Sébastien. 2004. « Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornièreage ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction. Montréal, École de Technologie Supérieure, 184 p.
- Langlois, Pierre. 2005. *Enrobés - Formulation selon la méthode LC*. Coll. « Ministère des Transports ». Québec: Bibliothèque nationale du Québec.

- Li, Kun, Hewei Lu, Lijun Sun, Liping Liu et Weidong Huang. 2011. « Glasphalt Mixtures' Performance Research and Analysis ». In *ICTE 2011*. p. 1427-1432. < <http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/41184%28419%29236> >. Consulté le 10 Décembre 2012.
- Malish, Ward R., Delbert E. Day et Bobby G. Wixson. 1975. *Use of domestic waste glass for urban paving*. EPA-670/2-75-053. Cincinnati, Ohio: United States Environmental Protection Agency, 106 p.
- McLEOD, N. W. 1956. « Relationships between density, bitumen content and voids properties of compacted bituminous paving mixtures ». *Highway Research Board proceedings*. Vol. 35, p. 327-404.
- McRae, J. L. 1960. « Discussion of the paper Void Requirements for Dense-Graded Bituminous Paving Mixtures ». In *66th annual Meeting American Society for Testing Materials*. (Atlantic City, June 23-25), p. 108-112. Philadelphia (Pa): American Society for Testing Materials.
- Meunier, Mathieu. 2005. « Contribution à la mise au point des critères de formulation pour les enrobés SMA adaptés à la formulation du laboratoire des chaussées du ministère des transports du Québec ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction. Montréal, École de Technologie Supérieure, 278 p.
- Meunier, Mathieu. 2012. « Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat Montréal, École de Technologie Supérieure, 278 p.
- Ministère des Transports du Québec. 2012. « Orientation ministérielle sur le choix des types de chaussées 2010-2015 ». En Ligne, 34 p. < http://www.mtq.gouv.qc.ca/portal/page/portal/entreprises/zone_fournisseurs/reseau_routier/chaussee/orientation_ministerielle_choix_types_chaussees >. Consulté le 9 Mai 2013.
- Ministère des Transports du Québec. À jour au 30 Janvier 2013. *Tome II - Construction Routière*. En Ligne. Québec (QC): Publications Québec. < http://www3.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/produits/ouvrage_routier/normes/norme7.fr.html >. Consulté le 2 Mars 2013.
- Nguyen, Mai Lan. 2010. « Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux ». Thèse de doctorat en génie civil. Lyon, L'institut national des sciences appliquées, 310 p.
- Olard, François, et Hervé Di Benedetto. 2003. « General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes ». *Road Materials and Pavement Design*, vol. 4, n° 2, p. 185 à 224.

- Pajean, Gérard. 2007. « Une petite encyclopédie du verre : L'élaboration du verre ». *Verre*. En Ligne. Vol. 13, n° 5, p. 14-17. < <http://www.verreonline.fr/encyclopedia/doc/fabri1-Pajean.pdf> >. Consulté le 29 Mars 2013.
- Perraton, Daniel. 2012. *MGC 805 - Science des Matériaux*, Programme de Maîtrise en génie de la construction. Montréal: École de Technologie Supérieure, pagination multiple p.
- Perraton, Daniel, et François Olard. 2013. *Les enrobés bitumineux : Formulation, fabrication et mise en place*, Programme de Maîtrise en génie de la construction. Montréal: École de Technologie Supérieure, 277 p.
- Québec, Gouvernement du. 2002. « Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction ». Québec: Les Publications du Québec, 50 p.
- Québec, Gouvernement du. 2011. « Politique Québécoise de Gestion des Matières Résiduelles - Plan d'action 2011 - 2015 ». Les Publications du Québec.
- Québec, Ministère des Transport du. 2013. *Cahier des Charges et Devis Généraux - Construction et Réparation*. Québec: Les Publications du Québec.
- Recyc-Québec. 2006. « Fiche d'information : Le Verre ». En Ligne, 8 p. < [http://www.reduiremesdechets.com/pdf/verre\(15\).pdf](http://www.reduiremesdechets.com/pdf/verre(15).pdf) >. Consulté le 31 mars 2013.
- Recyc-Québec. 2013a. « Indice du prix des matières ». In *Le site de Recyc-Québec*. En Ligne. < <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/industrie/prix.asp> >. Consulté le 27 mai 2013.
- Recyc-Québec. 2013b. « Répertoire québécois des récupérateurs, recycleurs et valorisateurs ». In *Le site de Recyc-Québec*. En Ligne. < <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/repertoires/rep-recuperateurs.asp> >. Consulté le 5 avril 2013.
- Shell, Bitumen. 1995. *The Shell Bitumen Industrial Handbook*. 411 p.
- Sousa, Jorge B., Joseph Craus et Carl L. Monismith. 1991. *Summary report on permanent deformation in asphalt concrete*. Coll. « Strategic Highway Research Program », SHRP-A/IR-91-104. Washington, DC: National Research Council, 125 p.
- Touhara, Radouen. 2012. « Étude de la résistance en fatigue des matériaux bitumineux ». Mémoire de maîtrise en génie de la construction. Montréal, École de Technologie Supérieure, 215 p.

- US Environmental Protection Agency. 1992. « Markets for Recovered Glass ». En Ligne, 33 p. < <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/cok.pdf> >. Consulté le 29 mars 2013.
- US Environmental Protection Agency. 2009. « Municipal solid waste generation : Recycling and disposal in the United States : Facts and figures for 2008 ». En Ligne, 12 p. < <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2008rpt.pdf> >. Consulté le 31 mars 2013.
- Watson, Tom. 1988. « When the tire hits the glasphalt ». *Resource Recycling*. En Ligne. n° July 1988, p. 18-21. < <http://infohouse.p2ric.org/ref/02/01286.pdf> >. Consulté le 11 Janvier 2013
- William, M.L., R.F. Lander et J.D. Ferry. 1955. « The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids ». *J. of American Chemistry Society*, n° 20.
- Wu, Shaopeng, Wenfeng Yang et Yongjie Xue. 2004. *Preparation and Properties of Glass-asphalt Concrete*. Key Laboratory for Silicate Materials Science and Engineering of Ministry of Education: Wuham University of Technology.
- Young, J. Francis, Sidney Mindess, Robert J. Gray et Arnon Bentur (384). 1998. *The Science and Technology of Civil Engineering Materials*. Coll. « Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics ». Upper Saddle River (Ny): Prentice Hall.